

Tim Gocke

***Objektivierte Homogenitätsbewertung des Erscheinungsbildes
automobiler Signalleuchten***

DOI: 10.22032/dbt.39795

URN: urn:nbn:de:gbv:ilm1-2019200480

Zuerst als Druckausgabe erschienen:

Gocke, Tim:

Objektivierte Homogenitätsbewertung des Erscheinungsbildes automobiler
Signalleuchten / Tim Gocke. - Uelvesbüll : Der Andere Verl., 2013. - f, X, 256 S. :
Ill., graph. Darst.

ISBN 978-3-86247-403-5

(Publikationsreihe / Fachgebiet Lichttechnik TU Ilmenau ; 14)

Zugl.: Ilmenau, Techn. Univ., Diss., 2013

Objektivierte Homogenitätsbewertung des Erscheinungsbildes automobiler Signalleuchten

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktoringenieur
(Dr.-Ing.)

vorgelegt der Fakultät für Maschinenbau
der Technischen Universität Ilmenau

von Herrn

Dipl.-Ing. Tim Gocke

geboren am 23.10.1982
in Dortmund/Deutschland

vorgelegt am: 01. Juni 2013

verteidigt am: 15. November 2013

Gutachter: Univ.-Prof. Dr. sc. nat. Christoph Schierz
Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Tran Quoc Khanh
Dr.-Ing. Andreas Kaltenbach

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit in der Abteilung Licht- und Sichtsysteme der BMW Group in München.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr. sc. nat. Christoph Schierz für die Betreuung dieser Arbeit, die begleitende Unterstützung, welche zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen hat, und nicht zuletzt für das mir entgegengebrachte Vertrauen.

Für die Übernahme des Koreferats, die kritische Durchsicht der Arbeit sowie die Ratschläge und Hinweise möchte ich mich herzlich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Tran Quoc Khanh bedanken.

Für die Rahmenbedingungen, die diese Arbeit ermöglicht haben aber auch für das angenehme fachliche und persönliche Klima bedanke ich mich herzlich bei Herrn Dr. Volker Levering. Herrn Dr. Andreas Kaltenbach als meinen Mentor und Kollegen bin ich für seine Unterstützung, die fachlichen Anregungen und konstruktiven Diskussionen zu großem Dank verpflichtet. Bei meinen Vorgesetzten Herrn Dr. Stefan Danner und Jörg Kälble sowie den Kollegen der Fachabteilung und den zahlreichen Probanden möchte ich mich für ihr Verständnis, ihre Hilfe und wichtige Anregungen bedanken.

Des Weiteren möchte ich mich an dieser Stelle auch bei den Mitarbeitern des Lehrstuhls Lichttechnik der TU Ilmenau, insbesondere bei Herrn Nolte, für die Bereitstellung der Messtechnik bedanken.

Vielen Dank auch an meine Eltern, Freunde und Verwandte, die mich während meiner Doktorandenzeit mit Korrekturlesungen und Sachmitteln unterstützt haben.

Mein ganz besonderer Dank gilt meiner Frau Svenja, die mich in meiner Arbeit stets unterstützte und mir in allen Situationen zur Seite stand.

München, im Juni 2013

Tim Gocke

Erklärung

(gemäß Anlage 1 der Siebten Änderung der Promotionsordnung der TU Ilmenau Allgemeine Bestimmungen)

Ich versichere, dass ich die vorliegende Arbeit ohne unzulässige Hilfe Dritter und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe. Die aus anderen Quellen direkt oder indirekt übernommenen Daten und Konzepte sind unter Angabe der Quelle gekennzeichnet. Bei der Auswahl und Auswertung folgenden Materials haben mir die nachstehend aufgeführte Person in der jeweils beschriebenen Weise unentgeltlich geholfen:

- Peter Schreier Diplomarbeit

Weitere Personen waren an der inhaltlich-materiellen Erstellung der vorliegenden Arbeit nicht beteiligt. Insbesondere habe ich hierfür nicht die entgeltliche Hilfe von Vermittlungs- bzw. Beratungsdiensten (Promotionsberater oder anderer Personen) in Anspruch genommen. Niemand hat von mir unmittelbar oder mittelbar geldwerte Leistungen für Arbeiten erhalten, die im Zusammenhang mit dem Inhalt der vorgelegten Dissertation stehen.

Die Arbeit wurde bisher weder im In- noch im Ausland in gleicher oder ähnlicher Form einer Prüfungsbehörde vorgelegt.

Ich bin darauf hingewiesen worden, dass die Unrichtigkeit der vorstehenden Erklärung als Täuschungsversuch bewertet wird und gemäß § 7 Abs. 10 der Promotionsordnung den Abbruch des Promotionsverfahrens zur Folge hat.

(Ort, Datum)

(Unterschrift)

Kurzzusammenfassung

Bei einem Autokauf spielen neben den funktionalen zunehmend design- und markenprägende Aspekte eine entscheidende Rolle. Die Exterieurbeleuchtung des Fahrzeugs nimmt hier eine stetig wachsende Bedeutung ein.

Mit verschiedenen optischen Technologien ist es in der heutigen Zeit möglich, Beleuchtungskomponenten individuell mit einer Formensprache zu gestalten. Der markenprägende Charakter wird im Scheinwerfer und auch immer mehr in der Heckleuchte durch sogenannte Lichtikonen realisiert. Lichtikonen sind für einen Beobachter wiedererkennbare, markenspezifische, leuchtende Geometrien innerhalb einer Leuchte. Sie unterscheiden sich je nach Fahrzeughersteller in ihrer Ausprägung durch die geometrische Formgestaltung, die Lichtfunktion und die technische Realisierung.

Zu Beginn des Produktentstehungsprozesses werden verschiedene funktionale, gesetzliche, finanzielle und ästhetische Anforderungen an eine ikonisierte Leuchte gestellt, die in einem Zielkonflikt stehen. In dieser Arbeit steht der ästhetische Aspekt der Homogenität im Fokus. Hierbei wird zwischen einer farblichen und helligkeitsbedingten Homogenität unterschieden, die lokal innerhalb einer leuchtenden Fläche oder global über mehrere leuchtende Flächen einer Leuchte bewertet werden kann.

Da derzeit keine Verfahren für eine robuste Bewertung der Homogenität in typischen Bewertungsszenarien zur Verfügung stehen, erfolgt die Validierung der Homogenität momentan nur rein subjektiv erst am Ende des Produktentstehungsprozesses. Das Ziel der Arbeit ist es, geeignete Gütekriterien und Grenzwerte für verschiedene Inhomogenitätsklassen zu ermitteln, damit eine objektivierbare Bewertung der Homogenität einer Leuchte zu jedem Schritt des Produktentstehungsprozesses möglich ist.

Für die Realisierung dieser Ziele werden zunächst bekannte und neuentwickelte Gütekriterien definiert. Anschließend werden verschiedene Probandenuntersuchungen zur Bewertung der Homogenität durchgeführt, bei denen einerseits reale Kraftfahrzeugleuchten und andererseits realitätsnahe Simulatoren als parametrisierbare Versuchsobjekte unter verschiedenen Umgebungslichtbedingungen eingesetzt werden. Mit den subjektiven Probandenbewertungen und den objektiven Gütekriterien wird für jeden Versuch eine Korrelationsanalyse durchgeführt. Mit Hilfe des Bestimmtheitsmaßes wird die Verwendbarkeit jedes Gütekriteriums hinsichtlich einer objektivierten Homogenitätsbewertung geprüft und für das am besten geeignete Kriterium ein Grenzwert in Abhängigkeit der Randbedingungen ermittelt.

Abstract

When buying a car, design and brand-defining aspects are playing an increasingly important role besides functional elements. The exterior lighting of the vehicle plays an ever more important role in this decision. With the help of various optical technologies it is possible today to design individual lighting components with a form language of their own. The brand-defining character is not only realised in the headlights, but increasingly so in the tail lights as so-called light icons. Light icons are illuminated geometric figures within a light that are recognised by observers as brand-specific. Their characteristics vary among vehicle manufacturers depending on the geometric form, the light function, and their technical implementation.

At the beginning of the product development process a number of different and conflicting functional, statutory, financial and aesthetic requirements are imposed on an iconised light. This paper focuses on the aesthetic aspect of homogeneity. We distinguish between colour and brightness homogeneity which can be assessed either within an illuminated area or globally across several of illuminated areas of a light. Since no techniques exist as yet for a robust assessment of homogeneity in typical assessment scenarios, the homogeneity is currently validated purely subjectively at the end of the product development process. The objective of the paper is to elucidate suitable quality criteria and thresholds for various inhomogeneity classes to enable objective assessment of the homogeneity of a light at every stage of the product development process.

Known and newly-developed quality criteria are initially used for realising this objective. A series of volunteer studies are then conducted to assess the homogeneity. These apply not only genuine vehicle lights, but also realistic simulators as objectifiable test objects under different ambient light conditions. A correlation analysis is then conducted with the subjective volunteer assessments and the objective quality criteria for each test. The applicability of each quality criterion for an objectified homogeneity assessment is tested using the coefficient of determination, and a threshold value is calculated for the most suitable criterion depending on the constraints.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Motivation	1
1.2	Ziele	4
1.3	Ansatz	5
2	Grundlagen - Stand der Technik	7
2.1	Lichttechnische Anforderungen an die Fahrzeugbeleuchtung	7
2.1.1	Gesetzliche Anforderungen	10
2.1.2	Funktionale Anforderungen	15
2.1.3	Ästhetische Anforderungen	17
2.2	Inhomogenes Erscheinungsbild von lichttechnischen Fahrzeugkomponenten . .	19
2.2.1	Klassifizierung von Inhomogenitäten	19
2.2.2	Bewertungsszenarien von Inhomogenitäten im Alltag	23
2.3	Technische Ursachen von Inhomogenitäten	25
2.3.1	Leuchtenkonzept	26
2.3.1.1	Geometrie der Leuchte	26
2.3.1.2	Optische Technologien	27
2.3.1.3	Lichtquellen	33
2.3.2	Leuchtenproduktion	42
2.3.2.1	Werkzeugtoleranzen	42
2.3.2.2	Positionierungstoleranzen	43
2.3.3	Leuchtenalterung	44
2.3.3.1	Werkzeugabnutzung	44
2.3.3.2	Umwelteinflüsse	44
2.4	Visuelle Wahrnehmung von Inhomogenitäten	46
2.4.1	Helligkeitsempfindung	47
2.4.2	Adaptationsleuchtdichte	51
2.4.3	Farbempfindung	54
2.4.4	Kontrastempfindung	57
2.4.4.1	Adrian-Modell	57
2.4.4.2	Kokoschka-Modell	59
2.4.4.3	Lokaler und globaler Kontrast	60
2.4.5	Formempfindlichkeit	61

2.4.6	Störempfindung	64
2.4.7	Verminderung der Sehleistung im Alter	66
3	Gütekriterien zur Bewertung von Inhomogenitäten	67
3.1	Anforderungen an die Gütekriterien	67
3.2	Globale und lokale Auswertung der Gütekriterien	67
3.3	Bewertung der Homogenität von Signalfunktionen im Hinblick auf Farbigkeit .	68
3.3.1	MacAdam Ellipsen	68
3.3.2	Rechnerische Bestimmung von Ellipsen gleicher Farbwahrnehmung . . .	70
3.4	Bewertung der Homogenität von Signalfunktionen im Hinblick auf Helligkeit .	72
3.4.1	Statistische Bewertungsmethode mit Extremwerten	73
3.4.2	Statistische Bewertungsmethode mit Lageparametern	74
3.4.3	Statistische Bewertungsmethode mit Streuungsparametern	75
3.4.4	Bewertungsmethode mit Gradienten	75
3.4.5	Bewertungsmethode auf der Basis von Schwerpunkten	77
3.4.6	Bewertungsmethode auf der Basis von Kontrastschwellenmodellen . . .	79
4	Untersuchungen zur farblichen Homogenität von Signalfunktionen	84
4.1	Untersuchungen am Positionslicht-Warmerscheinungsbildsimulator	84
4.1.1	Ziel der Untersuchungen	84
4.1.2	Versuchsaufbau	84
4.1.3	Erfassung der photometrischen Systemeigenschaften	85
4.1.4	Bewertung der photometrischen Systemeigenschaften	89
4.1.5	Versuchsprotokoll und –durchführung	91
4.1.6	Vorstellung der Ergebnisse	98
4.1.7	Diskussion der Ergebnisse	104
4.2	Untersuchungen mit realen Scheinwerfern	106
4.2.1	Ziel der Untersuchungen	106
4.2.2	Versuchsaufbau	106
4.2.3	Bewertung der photometrischen Systemeigenschaften	107
4.2.4	Versuchsprotokoll und –durchführung	111
4.2.5	Vorstellung der Ergebnisse	113
4.2.6	Validierung des Modells zur Bewertung von farblichen Inhomogenitäten	115
4.2.7	Modellbasierte Bewertung derzeitiger LED-Binnings	118
4.2.8	Diskussion der Ergebnisse	121
5	Untersuchungen zur Homogenität von Signallichtfunktionen	124
5.1	Hauptuntersuchungen am Warmerscheinungsbildsimulator	124
5.1.1	Ziel der Untersuchungen	124
5.1.2	Versuchsaufbau	124
5.1.3	Erfassung der photometrischen Systemeigenschaften	125

5.1.4	Bewertung der photometrischen Systemeigenschaften	126
5.1.5	Simulative Nachbildung von Schlussleuchten	126
5.1.6	Versuchsprotokoll und –durchführung	130
5.1.7	Vorstellung der Ergebnisse	132
5.1.8	Korrelationsanalyse	134
5.1.8.1	Lokale Inhomogenitäten	136
5.1.8.2	Globale Inhomogenitäten	139
5.1.9	Grenzwurtermittlung	139
5.1.9.1	Lokale Inhomogenitäten	141
5.1.9.2	Globale Inhomogenitäten	142
5.1.10	Diskussion der Ergebnisse	143
5.2	Validierungsuntersuchungen mit realen Heckleuchten unter nachtähnlichen Bedingungen	145
5.2.1	Ziel der Untersuchungen	145
5.2.2	Versuchsaufbau	145
5.2.3	Bewertung der photometrischen Systemeigenschaften	146
5.2.4	Versuchsprotokoll und –durchführung	147
5.2.5	Vorstellung der Ergebnisse	149
5.2.6	Korrelationsanalyse	150
5.2.7	Grenzwurtermittlung	153
5.2.8	Diskussion der Ergebnisse	154
5.3	Validierungsuntersuchungen mit realen Heck- und Frontleuchten unter tageslichtähnlichen Bedingungen	156
5.3.1	Ziel der Untersuchungen	156
5.3.2	Versuchsaufbau	156
5.3.3	Bewertung der photometrischen Systemeigenschaften	157
5.3.4	Versuchsprotokoll und –durchführung	160
5.3.5	Vorstellung der Ergebnisse	161
5.3.6	Korrelationsanalyse	162
5.3.7	Grenzwurtermittlung	164
5.3.8	Diskussion der Ergebnisse	165
6	Zusammenfassung und Ausblick	167
	Anhang	182
A	Datenblätter Messtechnik	183
A.1	Auszug Datenblatt LMK-Color 98-3	184
A.2	Auszug Datenblatt Specbos 1201	186
B	Herleitung von Bewertungsszenarien im Alltag	188

C	Anhang zu den Untersuchungen am Positionslicht-Warmerscheinungssimulator	193
C.1	Photometrische Stabilität des Positionslicht-Warmerscheinungssimulators	193
C.2	Farberzeugung eines D-ILA Projektors	195
C.3	Farbmischalgorithmus des Positionslicht-Warmerscheinungsbildsimulators . . .	196
C.4	Fehlerbetrachtung des Positionslicht-Warmerscheinungsbildsimulators	200
C.5	Probandenergebnisse	202
C.6	Eingangsgrößen - Grenzellipsenapproximation	209
C.7	Ellipsenapproximation	211
C.7.1	Rücktransformationsalgorithmus	211
C.7.2	Ellipsenapproximation mit den PSW-Versuchsergebnissen	212
D	Anhang zu den Untersuchungen mit Scheinwerfern	219
D.1	Farborte Grenzmuster	220
D.2	Darstellung der Probandenergebnisse	224
E	Anhang zu den Untersuchungen am Warmerscheinungsbildsimulator	227
E.1	Photometrische Stabilität des Warmerscheinungsbildsimulators	227
E.2	Inhomogenitätsmuster	228
E.3	Ergebnisse der Signifikanzanalyse	229
E.4	Ergebnisse der Korrelationsanalyse	231
E.4.1	Darstellung der Korrelationsanalyseergebnisse unter Einbezug aller lokalen Inhomogenitäten	231
E.4.2	Auswertung des Bestimmtheitsmaßes nach den lokalen Inhomogenitäten	235
F	Anhang zu den Validierungsuntersuchungen mit Heckleuchten	237
F.1	Bewertung der photometrischen Systemeigenschaften	237
F.2	Ergebnisse der Signifikanzanalyse	237
F.3	Ergebnisse der Korrelationsanalyse	240
F.3.1	Auswertung des Bestimmtheitsmaßes	240
F.3.2	Darstellung der Korrelationsanalyseergebnisse	242
G	Kontrastschwellenmodell nach Adrian	246
G.1	Testzeichengröße F_S	246
G.2	Testzeichenkontrastpolarität F_{CP}	246
G.3	Darbietungsdauer F_T	247
G.4	Altersfaktor F_A	248
	Literaturverzeichnis	249

Verzeichnis der Formelzeichen und Abkürzungen

Symbol/Abk.	Benennung	Einheit
Kapitel 2		
ABBL	Abbiegelicht	
ABL	Abblendlicht	
CAD	Computer aided design	
CIE	Commission Internationale de l'Éclairage	
CMC	Colour Measurment Commitee of English Dyers und Co- lourists Society	
CMVSS	Canadian Motor Vehicle Safety Standard	
ECE	Economic Commission for Europe	
FL	Fernlicht	
FLK	Frontleuchtenkombination	
FMVSS	Federal Motor Vehicle Safety Standard	
FRAZ	Fahrtrichtungsanzeiger	
GaN	Galliumnitrid	
HBL	hochgesetzte Bremsleuchte	
HLK	Heckleuchtenkombination	
InGaN	Indiumgalliumnitrid	
IR	innerer Ring	
KZL	Kennzeichenleuchte	
LED	Licht emittierende Diode	
LUCO-LED	Lumineszenzkonversions-LED	
NSW	Nebelscheinwerfer	
OLED	Organische LED	
OVT	Türgriffbeleuchtung	
pc-LED	phosphorkonvertierende LED	
PMMA	Polymethylmethacrylat	
PO	Positionslicht	
RAMSIS	Rechnergestütztes Anthropometrisch-Mathematisches Sys- tem zur Insassen-Simulation	
SAE	Society of Automotive Engineers	
SML	Seitenmarkierungsbeleuchtung	

Symbol/Abk.	Benennung	Einheit
TFL	Tagfahrlicht	
ZBL	Zusatzblinkleuchte	
ÄR	äußerer Ring	
α	Sehwinkel	°
α_{\min}	minimaler Sehwinkel	°
ΔL_{th}	Schwellenleuchtdichte	$\frac{cd}{m^2}$
Δx	Farbwertanteiländerung x (CIE Lxy Farbtafel)	
Δy	Farbwertanteiländerung y (CIE Lxy Farbtafel)	
λ	Wellenlänge	nm
τ_p	Transmissionsgrad der Augenmedien	
Θ	Öffnungswinkel	°
Y_{weiss}	Normfarbwert	
φ_{Λ}^k	Farbreizfunktion	
A	leuchtende Fläche	m^2
a	Faktor	
A_{Kegel}	Stirnfläche eines Kegels	m^2
A_p	Pupillenfläche des Auges	m^2
age	Alterungsfaktor	
C	Leuchtdichtekontrast	
C_{global}	globaler Kontrast	
C_{lokal}	lokaler Kontrast	
C_{th}	Schwellenkontrast	
d_L	Länge Lichtleiter	m
d_p	Pupillendurchmesser	m
d_p	Pupillenradius	m
E_{Λ}	Extinktion	
E_B	Beleuchtungsstärke der Netzhaut	lx
F_A	Faktor für das Alter des Beobachters	
F_{CP}	Faktor für die Kontrastpolarität	
F_S	Faktor für die Testzeichengröße	
F_T	Faktor für die Darbietungsdauer	s
H	horizontaler Beobachtungswinkel	°
I_p	Pupillen-Lichtstärke	cd
k	Normierungsfaktor	
L	Leuchtdichte des gesamten Lichtfeldes	$\frac{cd}{m^2}$
L_a	Adaptationsleuchtdichte	$\frac{cd}{m^2}$
L_{hom}	homogene, mittlere Leuchtdichte	$\frac{cd}{m^2}$

Symbol/Abk.	Benennung	Einheit
L_{komp}	Kompensationsleuchtdichte	$\frac{cd}{m^2}$
L_m	mittlere Leuchtdichte	$\frac{cd}{m^2}$
L_O	Objektleuchtdichte	$\frac{cd}{m^2}$
L_o	Leuchtdichte des Testobjekts	$\frac{cd}{m^2}$
L_q	äquivalente Adaptionsleuchtdichte	$\frac{cd}{m^2}$
L_{seq}	Schleierleuchtdichte	$\frac{cd}{m^2}$
L_U	Umgebungsleuchtdichte	$\frac{cd}{m^2}$
L_u	Leuchtdichte der Umgebung	$\frac{cd}{m^2}$
n	Anzahl	
p	Pigmentierung der Iris	
r	Radius	m
S	Sehschärfe	'
S_Λ	Strahlungsfunktion	
S_A	ausgestrahlter Strahlung	W
S_E	eingestrahler Strahlung	W
t	Betrachtungsdauer	s
T_J	Junktiontemperatur	K
V	vertikaler Beobachtungswinkel	$^\circ$
$V'_{10}(\lambda)$	Spektrale Empfindlichkeitskurve für das Nachtsehen	
$V_2(\lambda)$	Spektrale Empfindlichkeitskurve für das Tagsehen	
VL	Visibility Level	
x	Entfernung	m
$x(\lambda), y(\lambda), z(\lambda)$	Normspektralwertfunktionen	
y	Abstand	m

Kapitel 3

GF	Farbbewertungsgütekriterium
GH	Helligkeitsgütekriterium
GK	Gütekriterium

$\Delta x_{ij}, \Delta y_{ij}$	Ortskoordinaten	
\bar{L}	Leuchtdichtemittelwert	$\frac{cd}{m^2}$
σ_E	Standardabweichung	
φ	Neigung der Ellipse zur x-Farbwertanteilachse	$^\circ$
$o(\vec{n})$	Einheitsvektor	
\vec{o}	Vektor	
A	Größe der Ellipsenfläche	
a	Ausdehnung der großen Halbachse	

Symbol/Abk.	Benennung	Einheit
b	Ausdehnung der kleinen Halbachse	
E	Beleuchtungsstärke	cd
E	quadratischer Fehler	
g	Ellipsenparameter	
K	Kennzahl	
L	Leuchtdichte	$\frac{cd}{m^2}$
L_a	Adaptationsleuchtdichte	$\frac{cd}{m^2}$
L_{Median}	Median der Leuchtdichte	$\frac{cd}{m^2}$
L_{seq}	Schleierleuchtdichte	$\frac{cd}{m^2}$
$L_{x\%Q}$	Quantil der Leuchtdichte	$\frac{cd}{m^2}$
LSE	Least-Square Error	
$n_{Pixel} S_{Messregion}$	Pixelgesamtanzahl einer Messregion	
$n_{Pixel} S_{sichtbar}$	Anzahl sichtbarer Pixel	
P_B	Breite eines Pixels	'
P_H	Höhe eines Pixels	'
S_p, S_g	geometrischer Schwerpunkt	
x_0, y_0	Ellipsenmittelpunkt	
dS_{xn}	Koordinatenabstand in x-Richtung	
dx_n	Ausdehnung in x-Richtung	
dy_n	Ausdehnung in y-Richtung	
Kapitel 4		
AL	Akzentleuchte	
CCD	Charge-coupled-device	
H30	Seitliche Beobachtungsrichtung - Horizontaler Winkel = 30° und vertikaler Winkel = 0°	
HV	Senkrechte Beobachtungsrichtung - Horizontaler und vertikaler Winkel = 0°	
PWS	Positionslicht-Warmerscheinungsbildsimulator	
$\Delta u'v'$	äquidistante Schrittweite	
$\Delta_{max} u'v'$	maximale Distanz	
\bar{e}_{Median}	mittlerer Standardfehler des Medians	
σ	Standardabweichung	
φ	Neigung der Ellipse	°
A	Größe der Ellipsenfläche	
a	Ausdehnung der großen Halbachse	
a_{min}, a_{max}	untere und obere Fehlertoleranz	

Symbol/Abk.	Benennung	Einheit
b	Ausdehnung der kleinen Halbachse	
b_{min}, b_{max}	untere und obere Fehlertoleranz	
e_{max}	maximaler Fehler	
e_{Median}	medianer Fehler	
e_{min}	minimaler Fehler	
n	Anzahl der Proben	
$p_{MedianD}$	Bewertungsstufe	
u'_{Ref}, v'_{Ref}	Referenzfarbort nach Transformation	
x_{El}, y_{El}	Ellipsenmittelpunkt	
x_{Ref}, y_{Ref}	Referenzfarbort	

Kapitel 5

R^2	Regressionsmaß	
EK	Einkoppelstelle	
ELEMENT	Elemente	
GK	Gütekriterium	
GW	Grenzwert	
H30	Seitliche Beobachtungsrichtung - Horizontaler Winkel = 30° und vertikaler Winkel = 0°	
HOMOGEN	homogene Schlussleuchten	
HV	Senkrechte Beobachtungsrichtung - Horizontaler und vertikaler Winkel = 0°	
STRUK	Struktur	
UE	Unterschiedsempfindlichkeit	
VERL	Verläufe	
WES	Warmerscheinungsbildsimulator	

Anhang

α_{LA}	außenseitiger Winkel	°
α_{LI}	innenseitiger Winkel	°
α	Schwinkel	°
α	Signifikanzniveau	
\bar{X}	Mittelwert einer Messreihe	
ϵ_{Λ}	Absorptionskoeffizient	$\frac{1}{cm}$
σ	Standardabweichung einer Messreihe	
φ	Neigung der Ellipse zur x-Farbwertanteilachse	°
a	Ausdehnung der großen Halbachse	
b	Ausdehnung der kleinen Halbachse	

Symbol/Abk.	Benennung	Einheit
d	Cohens Effektstärke	
$d_{\text{Fahrer-Haube}}$	Entfernung Fahrer, Motorhaube	m
$d_{\text{FZG-FZG}}$	Beobachtungsdistanz	m
$d_{\text{Sicherheit-Toleranz}}$	Sicherheitsabstand mit Toleranz	m
$d_{\text{Sicherheit}}$	Sicherheitsabstand	m
F_A	Faktor für das Alter des Beobachters	
F_{CP}	Faktor für die Kontrastpolarität	
F_S	Faktor für die Testzeichengröße	
F_T	Faktor für die Darbietungsdauer	s
g	Ellipsenparameter	
n	Anzahl der Probanden	
t	Betrachtungsdauer	s
t_{exp}	erwarteter T-Wert	
t_{tab}	tabellarischer T-Wert	
$u'_{\text{cal}}, v'_{\text{cal}}$	berechnete Farborte	
$u'_{\text{mess}}, v'_{\text{mess}}$	gemessene Farborte	
$u'_{\text{soll}}, v'_{\text{soll}}$	Soll-Farborte	

1 Einleitung

1.1 Motivation

Beim Autokauf spielen neben den funktionalen zunehmend design- und markenprägende Aspekte eine entscheidende Rolle. Hierbei ist die Exterieurbeleuchtung des Fahrzeugs von stetig wachsender Bedeutung.

Bis vor einigen Jahren war die Differenzierbarkeit ausschließlich nur am Tage durch markentypische Geometrien des gesamten Fahrzeugs gegeben. Das Nachterscheinungsbild aller Fahrzeuge war nahezu identisch. Auch am Tage war die Differenzierbarkeit eines Fahrzeugs im Hinblick auf die Beleuchtungskomponenten nur durch die äußere Geometrie der Leuchten gegeben, da das Innenleben der Leuchten in der Regel durch Streuscheiben verdeckt wurde.

Durch die Entwicklung von verschiedenen Technologien wie Freiform-Reflektoren, optikfreien Abschlusscheiben, Lichtleitern und LEDs ist es in der heutigen Zeit möglich, Beleuchtungskomponenten individuell mit einer Formensprache zu gestalten. So kann heute ein Fahrzeug auch in der Nacht durch eine markenprägende Signatur mit einem hohen Wiedererkennungswert einer Marke zugeordnet werden. Der markenprägende Charakter wird im Scheinwerfer und immer mehr in Heckleuchten durch sogenannte Lichtikonen realisiert. Lichtikonen sind für einen Beobachter wiedererkennbare, markenspezifische, leuchtende Geometrien innerhalb einer Leuchte. Sie unterscheiden sich je nach Fahrzeughersteller in ihrer Ausprägung durch die geometrische Formgestaltung, die realisierte Lichtfunktion und die technische Realisierung.

Am weitesten verbreitet sind Lichtikonen bei der Tagfahr-/Positionslichtfunktion, welche seit der Einführung der Positionslichtringe im 5er BMW aus dem Jahre 2001 etabliert wurde. In Abbildung 1.1 ist eine Übersicht von Tagfahrlichtikonen von verschiedenen Fahrzeugherstellern zu sehen. Die Position der Tagfahrlichtikonen kann aus unterschiedlichsten Gründen bei verschiedenen Fahrzeugprojekten variieren. Jedoch sind die Hersteller aufgrund der Wiedererkennbarkeit und der Markenprägung bestrebt, die Position und Form der Ikonen über die gesamte Fahrzeugflotte gleich zu gestalten.

Das Heck eines Fahrzeugs wird im Nachterscheinungsbild in der Regel durch die Schlusslichtikone geprägt (siehe Abbildung 1.2).

Nicht nur Signalfunktionen sondern auch Ausleuchtungsfunktionen, wie das Abblendlicht, wurden mit der Einführung des Audi A8 im Jahre 2010 zunehmend ikonisiert [89]. Mittlerweile

ist ein ikonisiertes Abblendlicht herstellerübergreifend, insbesondere in Oberklassenmodellen, vorzufinden. Aus Gründen der Wiedererkennbarkeit in der Nacht haben Fahrzeughersteller (z.B. BMW mit dem 7er und Audi mit dem A8) die Abblendlichtikone in dem Sonderausstattungsscheinwerfer entsprechend der Form der Tagfahrlichtikone gestaltet.

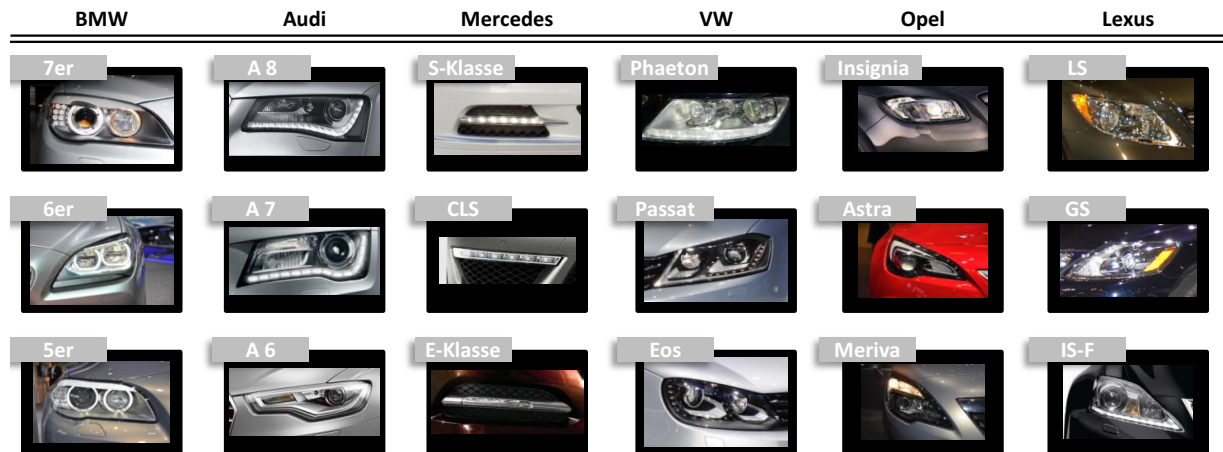


Abbildung 1.1: Marktübergreifende Analyse von Tagfahrlichtikonen (Stand 2012), Fotos entnommen aus [1]

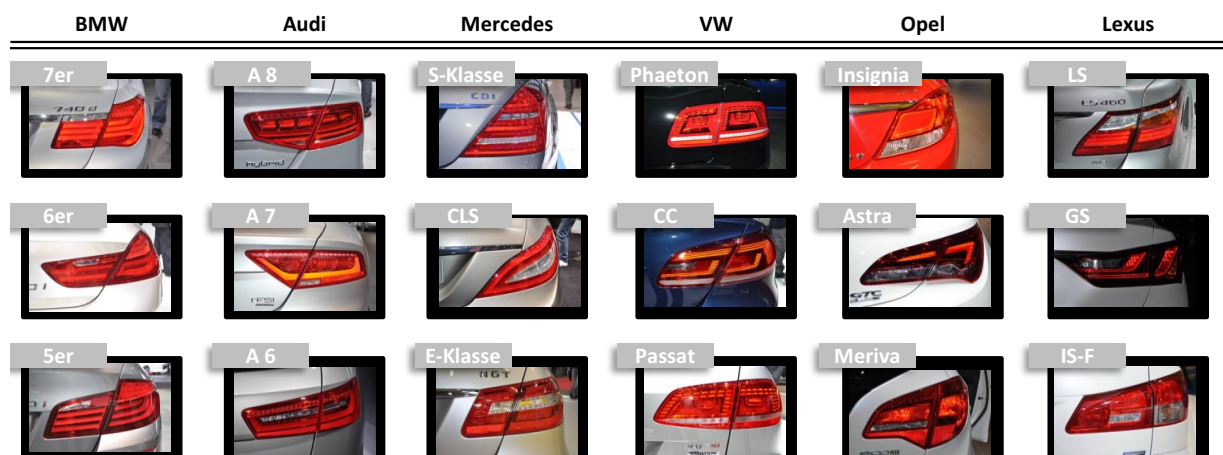


Abbildung 1.2: Marktübergreifende Analyse von Schlusslichtikonen (Stand 2012), Fotos entnommen aus [1]

Lichttechnische Komponenten werden derzeit analog zu dem in Abbildung 1.3 dargestellten Produktentstehungsprozess entwickelt und produziert. Zu Beginn einer Entwicklung werden in der Anforderungsphase auf den Kunden ausgerichtete Eigenschaften einer Leuchte spezifiziert. Die Ableitung der Anforderungen in Form eines Lastenhefts stellt die Lösung des Zielkonflikts aus funktionalen, gesetzlichen, finanziellen und ästhetischen Interessen dar, welche detailliert in Kapitel 2.1 erläutert werden. In dieser Arbeit steht der Aspekt der Homogenität im Mittelpunkt. Deshalb wird die Homogenität im Abschnitt 2.2 für eine spätere Bewertung und ein besseres

Verständnis ausführlich definiert sowie klassifiziert. Im Rahmen dieser Arbeit wird hierbei zwischen farblichen und helligkeitsbedingten Inhomogenitäten differenziert. Des Weiteren werden in Kapitel 2.2 typische Bewertungsszenarien definiert und Beobachtungsentfernungen sowie Betrachtungswinkel ermittelt.

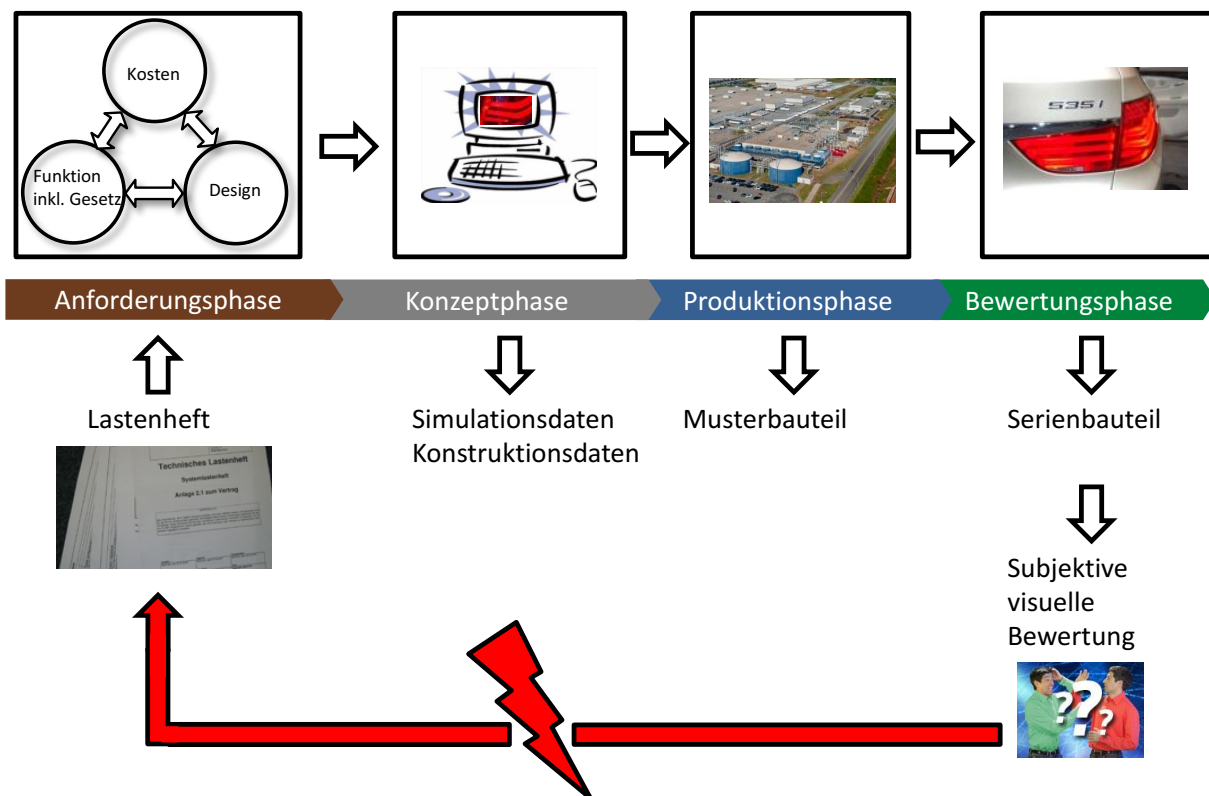


Abbildung 1.3: Produktentstehungsprozess

Abgeleitet aus den im Lastenheft beschriebenen Anforderungen wird ein Leuchtenkonzept erstellt. Die Fahrzeughersteller haben unterschiedliche Konzepte zur Realisierung von Leuchten mit Lichtikonen. Je nach Hersteller werden verschiedene Optiken und Lichtquellen (siehe Abschnitt 2.3) zur Realisierung der Lichtikonen verwendet. Hierbei wird gemäß des Entwicklungsprozesses von außen nach innen entwickelt. Das bedeutet, dass zunächst eine Kontur über eine Außenlichtscheibe und anschließend optische Technologien innerhalb der Leuchte definiert werden. Nach diesem Schritt erfolgt eine Festlegung der Lichtquellen sowie des Betriebsbereichs. Diese beiden Schritte der Optik- und Lichtquellenauswahl erfolgen in mehreren Änderungsschleifen, so dass ein bestmöglicher Kompromiss für die Erfüllung der funktionalen, gesetzlichen, ästhetischen und finanziellen Anforderungen erzielt wird. Das Resultat der Konzeptphase ist die virtuelle Auslegung der Leuchte samt Konstruktion der Leuchte, Berechnung der lichttechnischen Flächen sowie ein erstes Musterbauteil. Entspricht das Musterbauteil nicht den Anforderungen, so erfolgt im Rahmen der Konzeptphase eine weitere Optimierungsschleife. Ist alles in Ordnung, kann die Herstellung der Serienwerkzeuge gestartet werden.

Bereits während der Konzeptphase zeigt sich, dass jedes einzelne Bauteil einen Beitrag zur Homogenität einer Leuchte liefert. Daher ist es nicht nur wichtig, dass die Bauteile in der Entwicklung aufeinander abgestimmt sind, sondern auch, dass die Produktion der einzelnen Bauteile sowie die Montage aller Bauteile wiederholgenau und toleranzfrei sind. Nach dem Produktentstehungsprozess können im Laufe der Zeit Alterungserscheinungen entstehen wie zum Beispiel Abnutzungserscheinung auf Grund von Umwelteinflüssen.

Alle zuvor genannten Punkte können Einfluss auf die Erscheinung einer Leuchte im Hinblick auf die Homogenität nehmen. Daher werden für das Verständnis der Wirkkette und die Entstehung von Inhomogenitäten innerhalb einer Leuchte die technischen Ursachen in Abschnitt 2.3 dargestellt, welche in der Konzept-, Produktions- und Alterungsphase einen Beitrag zur Inhomogenität einer Leuchte leisten können.

Am Ende des Produktentstehungsprozesses erfolgt eine Validierung der Qualität, insbesondere der Homogenität, und der Funktion von den lichttechnischen Komponenten anhand von Serienbauteilen durch eine visuelle Expertenbegutachtung, die durch eine Fülle von visuellen Kriterien bestimmt wird. Die visuelle Wahrnehmung ist jedoch subjektiv und wird durch verschiedene Randbedingungen beeinflusst, welche detailliert in Abschnitt 2.4 beschrieben werden.

Derzeitige Messverfahren und -größen ermöglichen es nicht, Aussagen über subjektive Bewertung zur Homogenität zu treffen. Somit liegen die Schwächen des heutigen Produktentstehungsprozesses in folgenden Punkten:

- Individuell qualitativ schwankend
- Nicht standardisiert
- Nicht exakt reproduzierbar
- Zeitaufwändig

Zudem ist eine Rückkopplung der Ergebnisse in die Anforderungen und damit verbunden in das Lastenheft nicht gegeben.

1.2 Ziele

Aus den zuvor genannten Gründen ist es das Ziel dieser Arbeit, lichttechnische Komponenten im Hinblick auf die Homogenität unterschiedlicher Bauart miteinander zu vergleichen und mit Gütekriterien objektiviert zu bewerten. Im Fokus der subjektiven und objektiven Untersuchungen stehen hierfür insbesondere Lichtfunktionen wie das Tagfahr-, Positions- und Schlusslicht, welche technisch in Form von Lichtleitern und „glühenden“ Körpern umgesetzt sind.

Die gewonnenen Erkenntnisse sollen frühzeitig zu Beginn des Produktentstehungsprozesses in der Anforderungsphase in Form einer robusten Lastenheftspezifikation einfließen. Das ermittelte Gütekriterium und der Grenzwert sollen technologieunabhängig für die Homogenitätsbewertung von Leuchten einsetzbar sein und in jeder Phase des Produktentstehungsprozess angewendet werden können. Dies bietet den Vorteil, dass Missstände bzw. Missverständnisse, die aus Zeitgründen nicht mehr korrigierbar sind oder einen erheblichen Kostenaufwand nach sich ziehen, bereits zu Beginn und nicht erst am Ende der Entwicklung ausgeräumt werden können. Des Weiteren soll das ermittelte Gütekriterium inklusive eines Grenzwerts als ein schnittstellenübergreifendes Kommunikationshilfsmittel zur Optimierung und zur Qualitätsbestimmung der Homogenität einer Leuchte dienen.

1.3 Ansatz

Der Ansatz zur Objektivierung der Homogenität im Hinblick auf die Farbe und die Helligkeit ist in Abbildung 1.4 dargestellt. Der Objektivierungsprozess besteht aus mehreren Stufen, die sequenziell und parallel ablaufen können.

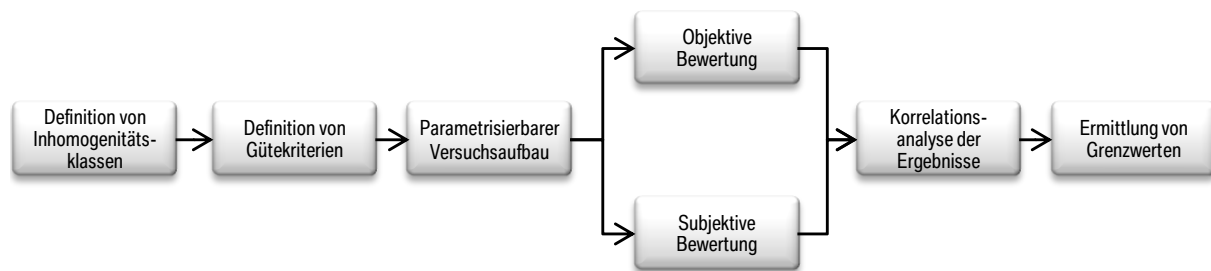


Abbildung 1.4: Schematische Darstellung des Objektivierungsprozesses

Der Ausgangspunkt für den Objektivierungsprozess stellt eine Definition der Homogenität in Form von Klassen und deren Eigenschaften sowie die Ermittlung von typischen Bewertungsszenarien dar (siehe Abschnitt 2.2). So kann sichergestellt werden, dass im Rahmen der nachfolgenden Untersuchungen die vollständige Bandbreite einer zu untersuchenden Eigenschaft im Versuchskollektiv abgebildet ist.

Des Weiteren werden in Kapitel 3 bereits verschiedene in der Literatur vorhandene und neu entwickelte Gütekriterien zur Bewertung von farblichen und helligkeitsbedingten Inhomogenitäten ausführlich vorgestellt, die im Rahmen dieser Arbeit in den weiteren Untersuchungen verwendet werden. Kapitel 3 beinhaltet auch die Anforderungen, die an zwölf beschriebenen Gütekriterien gestellt werden.

Im Zuge der Untersuchungen zu farblichen und helligkeitsbedingten Inhomogenitäten werden mit parametrisierbaren Versuchsaufbauten gute, schlechte und mittelmäßig homogene Signal-

leuchten ausgewählt. In dieser Arbeit werden jedoch nicht nur reale Lichtkomponenten als Versuchsobjekte verwendet, sondern es wird die Realität unter den Bedingungen einer geringen Abstraktion und einer hohen Reproduzierbarkeit mit Hilfe von Simulatoren nachgestellt. Dies wird in Kapitel 4 und 5 dargestellt.

Für die Erfassung der subjektiven Bewertung der Homogenität von Signalleuchten wurden im Rahmen dieser Arbeit mehrere Probandenstudien durchgeführt. Details zu den Probandenstudien hinsichtlich der Fragestellung und der weiteren Randbedingungen sind in den Kapiteln 4 und 5 beschrieben. Die Erfassung der objektiven photometrischen Eigenschaften erfolgt mit einer ortsauflösenden Leuchtdichtekamera und für die Farbbewertung wurde ein Spektrometer verwendet.

Mit den subjektiven Probandenbewertungen und den objektiven Gütekriterien wird für jeden der in den Kapiteln 4 und 5 vorgestellten Versuche eine Korrelationsanalyse durchgeführt. Da im Zuge dieser Arbeit die These aufgestellt wird, dass nicht jedes der vorgestellten Gütekriterien für die Homogenitätsbewertung gleich gut geeignet ist, beinhaltet die Analyse eine Bestimmung eines Regressionsmaßes. Mit Hilfe des Regressionsmaßes wird die Verwendbarkeit eines Gütekriteriums hinsichtlich einer objektivierten Homogenitätsbewertung geprüft und das am besten geeignete Kriterium ermittelt.

Für die am besten geeigneten Kriterien werden für die jeweiligen Versuche Grenzwerte bestimmt. Auf Grund der Veränderung der Rahmenbedingungen wird geprüft, welche Auswirkung z.B. Adaptationsleuchtdichte, Leuchtengeometrie und Helligkeit auf das Bestimmtheitsmaß nehmen und welche Grenzwerte für die jeweiligen Randbedingungen für ein homogenes Erscheinungsbild einer Leuchte vorzugeben sind. Abschließend werden die ermittelten Grenzwerte miteinander verglichen und kritisch beurteilt.

2 Grundlagen - Stand der Technik

Als Basis für die späteren Homogenitätsuntersuchungen in Kapitel 4 und 5 werden in diesem Kapitel alle Einflussfaktoren gemäß der Oberthemen Produktentstehung und Produktbewertung aus Abbildung 2.1 erläutert. Das Oberthema Produktentstehung mit den Unterthemen Anforderungsdefinition, Leuchtenentwicklung, -produktion und -alterung wird in Abschnitt 2.1 und 2.3 behandelt. Die Einflussfaktoren Sehobjekt, Bewertungsszenarien und Beobachter des Oberthemas Produktbewertung werden in Abschnitt 2.2 und 2.4 beschrieben.

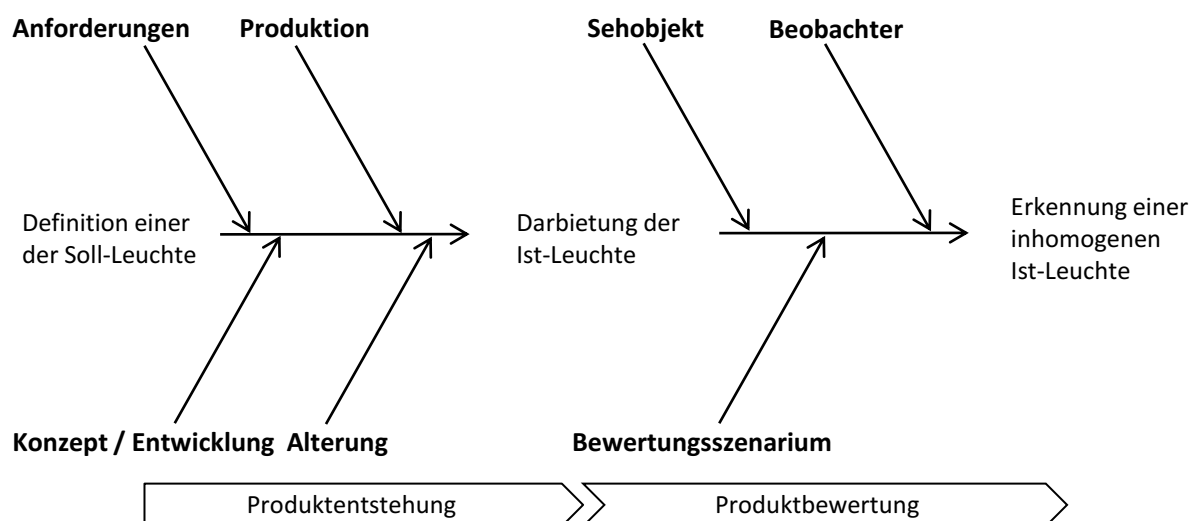


Abbildung 2.1: Gesamthafte Übersicht der Einflussfaktoren

2.1 Lichttechnische Anforderungen an die Fahrzeugbeleuchtung

Das Erscheinungsbild der Kraftfahrzeugbeleuchtung wird durch das Trilemma der Entwicklung geprägt (siehe Abbildung 2.2). Dieses Trilemma entsteht durch die Anforderungen an Kosten, Funktion (inklusive Gesetz) und Design, die in den nachfolgenden Kapiteln 2.1.1 bis 2.1.3 detailliert beschrieben werden.

Die genannten Anforderungen beeinflussen sich gegenseitig, sind zum Teil konträr und können zu einem Zielkonflikt führen, den es im Zuge der Entwicklung von Fahrzeugbeleuchtungskomponenten zu lösen gilt.

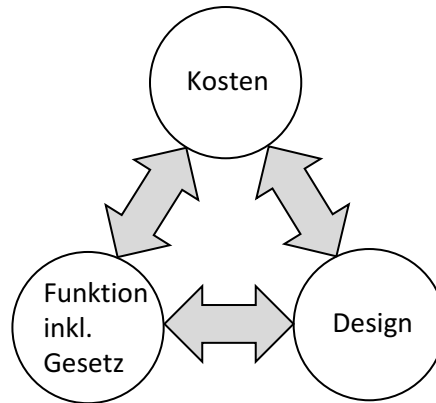


Abbildung 2.2: Darstellung des Trilemmas der Fahrzeugbeleuchtungsentwicklung

Durch eine Limitierung der Kosten kann sowohl das Design als auch die Funktion einer Leuchte stark beeinflusst werden. Vom Design aufwändig gestaltete Signalleuchtegeometrien können in der Regel nur mit Hilfe von kostenintensiven Technologien realisiert werden. Die Kosten der Leuchten verteilen sich auf das optische System, bestehend aus Primär-/Sekundäroptik und Lichtquellen, die elektrischen Ansteuerung und das Thermomanagement. Hauptkostentreiber sind die Lichtquellen.

Die Kosten für die Lichtquellen steigen in Abhängigkeit der Anzahl, der Verfügbarkeit, der Größe des Lichtstroms, des lichttechnischen Wirkungsgrades und des minimal benötigten Bauraums an. Aus diesem Grund sind die Kosten für eine Lichtquelle bei einer Laserdiode höher als bei einer LED, die wiederum teurer als eine Glühlampe ist. Bei der Auswahl der Lichtquelle müssen zusätzliche finanzielle Aufwände für das Thermomanagement berücksichtigt werden. Bei dem Einsatz von LEDs müssen eventuell benötigte Kühlkörper eingeplant werden. Bei der Verwendung von Glühlampen in Verbindung mit designbedingten geringen Bauräumen müssen auf Grund der höheren thermischen Verlustleistung kostenintensivere Werkstoffe mit einem höheren thermischen Schmelzpunkt eingesetzt werden.

Die design- bzw. erscheinungsbildbedingte Auswahl der Primär-/Sekundäroptik beeinflusst die Kosten einer Leuchte. Diese Kosten entstehen durch zeitintensivere Entwicklung und zusätzliche, aufwändigere Werkzeuge für Bauteile. Wenn mit einem optischen Konzept, bestehend aus Lichtquelle und Primär-/Sekundäroptik, zwar die ästhetischen, aber nicht die gesetzlichen Anforderungen erfüllt werden, können zwei Parameter des Systems variiert werden. Diese Parameter sind der eingesetzte Lichtstrom und der optische Wirkungsgrad der Primär-/Sekundäroptik. Durch den Einsatz von zusätzlichen oder lichtstärkeren Lichtquellen kann ein geringer optischer Wirkungsgrad unter der Prämisse der Zulassungsfähigkeit und der ästhetischen Anforderungen der Leuchte zu Lasten der Kosten ausgeglichen werden.

Eine Alternative um die gesetzlichen sowie die funktionalen Anforderungen zu erfüllen, stellt die Verbesserung des optischen Wirkungsgrads dar. Der optische Wirkungsgrad einer Primär-/Sekundäroptik wird durch die Abstrahlcharakteristik bestimmt. Gemäß den ästhetischen Anforderungen soll ein aus allen Beobachtungsrichtungen gleichbleibendes Erscheinungsbild der Leuchte realisiert werden. Nach BMW-Philosophie soll ein flächiges Erscheinungsbild umgesetzt werden (siehe Kapitel 2.1.3). Der Gesetzgeber stellt hingegen ausschließlich Anforderungen an die Sichtbarkeit von Signalleuchten, die unter anderem durch eine Lichtstärkeverteilung in einem definierten Winkelbereich sicher gestellt werden (siehe Kapitel 2.1.1). Somit soll der im Leuchtenkonzept eingesetzte Lichtstrom primär für die Erfüllung der gesetzlichen Anforderungen verwendet werden. Die Optimierung des Erscheinungsbildes ist aus Sicht des Gesetzgebers unbedeutend. Mit der Erhöhung des optischen Wirkungsgrads einer Leuchte unter der Prämisse einer Kostenlimitierung kann die Erfüllung der gesetzlichen Anforderungen erreicht, jedoch die Erfüllung der ästhetischen Anforderungen verfehlt werden.

Um den Zielkonflikt zu entschärfen, werden zu Beginn einer Leuchtenentwicklung separate Ziele inklusive einer Gewichtung zu den genannten Anforderungen definiert. Diese Ziele inklusive der Gewichtung sind jedoch nicht allgemein gültig, sondern werden von den Fahrzeugherstellern unter der Berücksichtigung der Markenidentität, der Bedürfnisse und der Kaufkraft des potenziellen Kundenstamms spezifisch für jedes einzelne Fahrzeugprojekt festgelegt.

2.1.1 Gesetzliche Anforderungen

Die gesetzlichen Anforderungen werden in großen Teilen der Welt durch die europäischen ECE-Regelungen (Economic Commission for Europe) und die amerikanischen Zulassungsgesetze des „Federal Motor Vehicle Safety Standard“ (FMVSS108) festgelegt (siehe Abbildung 2.3). In Kanada finden die Gesetze des „Canadian Motor Vehicle Safety Standard“ (CMVSS108) Anwendung. Sowohl die FMVSS108 als auch CMVSS108 beinhalten viele von der „Society of Automotive Engineers“ (SAE) erarbeitete Normen. In vielen Ländern der Welt werden nicht exakt die ECE-Regelung verwendet, sondern dienen nur als Basis für eigene länderspezifische Richtlinien (siehe Abbildung 2.3).

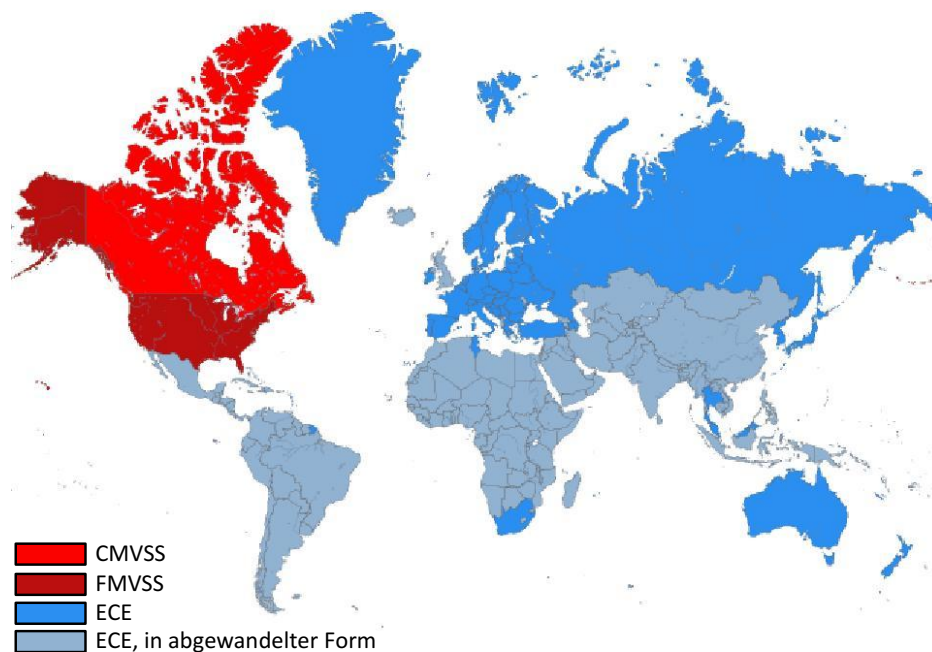


Abbildung 2.3: Darstellung der weltweiten Zulassungsräume [36], [76]

Die Festlegung von einheitlichen gesetzlichen Anforderungen dient dazu, die primären Funktionalitäten der Erkennbarkeit des Fahrzeugs bei Tag und Nacht, die Signalisierung von Fahrmanövern und die Ausleuchtung der Fahrbahn sicherzustellen.

Nach Bol, Decker und Finch erfolgt die Kodierung der Signale einfach oder redundant durch die Helligkeit, Farbe, Größe, Form, Position, Anzahl, Anordnung, Blinkfrequenz und durch die Textur [12],[38].

Die gesetzlichen Anforderungen für Signalleuchten werden durch Vorgaben zur minimalen sowie maximalen axialen Lichtstärke, räumlichen Lichtstärkeverteilung, Größe der leuchtenden Fläche und Farbe der Signalfunktion spezifiziert [36], [76]. Für die Gewährleistung der Signalerkennbarkeit sind zusätzlich geometrische Sichtbarkeitswinkel festgelegt. Des Weiteren

sind die Positionen der Lichtkomponenten durch die Anbauhöhe und den Abstand zwischen zwei Signalfunktionen definiert. Die Formgestaltung einer einteiligen Signalfunktion wird nicht durch gesetzliche Vorschriften reguliert. Bei mehrteiligen Signalfunktionen (bestehend aus fahrzeugfesten Leuchten in der Seitenwand und beweglichen Leuchten im Heckklappendeckel) wird die Formgestaltung durch die sogenannte 60-Prozent-Regel eingeschränkt. Nach ECE-Regelung R48 müssen mindestens 60 Prozent einer durch eine Hüllkurve aufgespannten Projektionsfläche mehrerer Teilfunktionen leuchten [36].

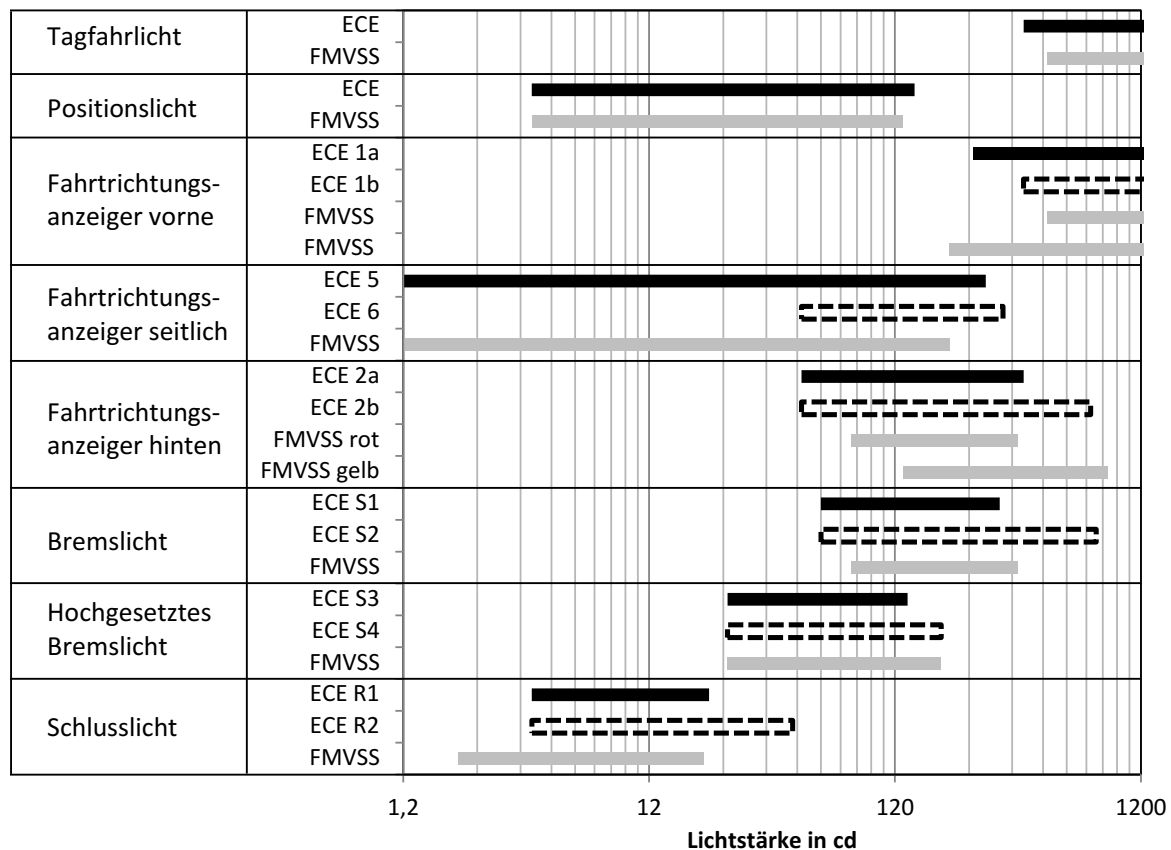


Abbildung 2.4: Lichtstärkeanforderung an Signalleuchten aus senkrechter Beobachtungsrichtung nach den ECE-Regelungen und FMVSS108 [36], [76]

Bei dem Vergleich der weltweiten Anforderungen ist generell festzustellen, dass es unterschiedliche gesetzliche Anforderung gibt, die bei der Entwicklung einer Leuchte zu berücksichtigen sind. Hierbei sind seitens der FMVSS108 für die Erfüllung der Anforderungen höhere Mindestlichtstärken gefordert. Dies ist in Abbildung 2.4 in Form von Balkendiagrammen mit einer schwarzen und grauen Farbkodierung dargestellt. Die FMVSS108 stellt in Abhängigkeit des Abstands zwischen den Tagfahr- und Abblendlichtquellen (Abstand kleiner oder größer 10 cm) differenzierte lichttechnische Anforderungen an das Tagfahrlichts. Im Gegensatz zur FMVSS108 Regelungen besteht durch die ECE-Regelungen die Möglichkeit, Leuchten mit variablen Mindestlichtstärken (in Abbildung 2.4 verdeutlicht als schwarze gestrichelte Linien) zu entwickeln.

So kann das Erscheinungsbild und die Signalisierung an die Umgebungsbedingungen (z.B. Tag - Nacht, Trocken - Regnerisch) adaptiert werden.

Die FMVSS108-Regelung stellt im Gegensatz zu den ECE-Regelungen zur Sicherstellung der Erkennbarkeit der Signalleuchten und zur Vermeidung von Blendungen zusätzliche Anforderungen an die Größe der leuchtenden Flächen. Einzig für die Tagfahrlichtleuchten werden Flächenanforderungen mit einer minimalen und maximalen Größe (25 cm^2 - 200 cm^2) seitens der ECE-Regelung festgelegt (siehe Abbildung 2.5) [76].

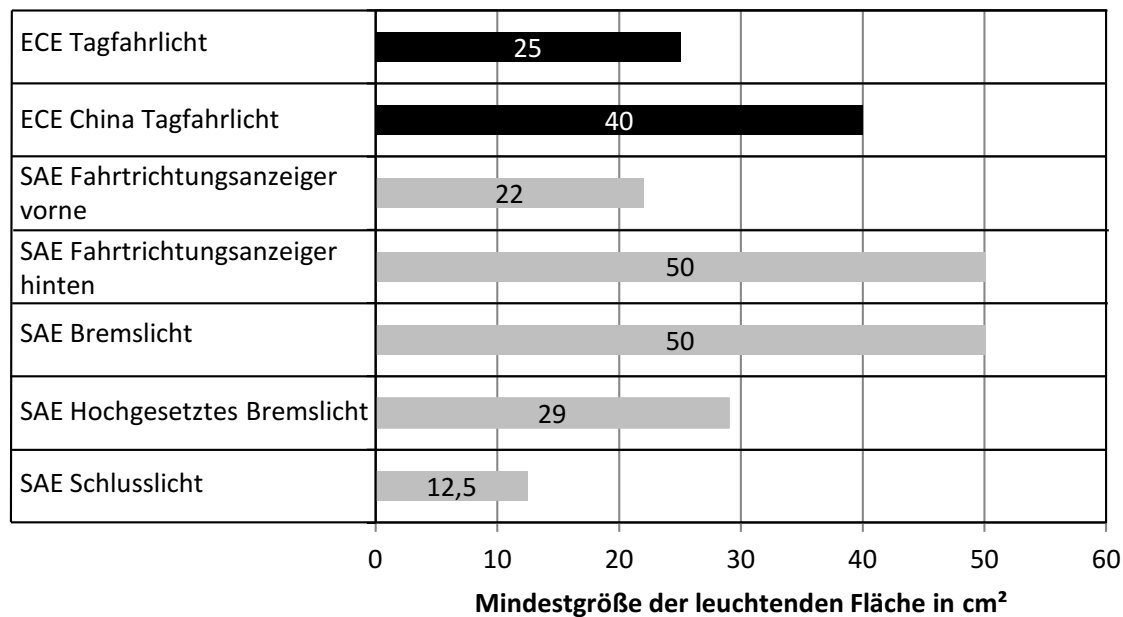


Abbildung 2.5: Flächenanforderung an Signalleuchten nach den ECE-Regelungen und FMVSS 108 [36], [76]

Die einzelnen Farben (gelb, rot und weiß) der Lichtfunktionen sind durch Bereiche in der CIE Lxy-Farbtabelle nach ECE-Regelung R48 und SAE J578-2002 spezifiziert [36], [103]. Speziell für weiße Lichtfunktionen bedeutet dies, dass Technologien mit unterschiedlichen Farbeigenschaften z.B. LEDs, Gasentladungs- und Glühlampen eingesetzt werden können. Wie in Abbildung 2.6 gezeigt, differenzieren sich die zulässigen Farbbereiche der FMVSS- und ECE-Regelungen für rote und gelbe Lichtfunktionen gar nicht und weiße Lichtfunktionen nur geringfügig. Eine Besonderheit der FMVSS108-Regelung liegt darin, dass die Farbkodierung der hinteren Fahrtrichtungsanzeiger sowohl in gelb als auch in rot erfolgen darf.

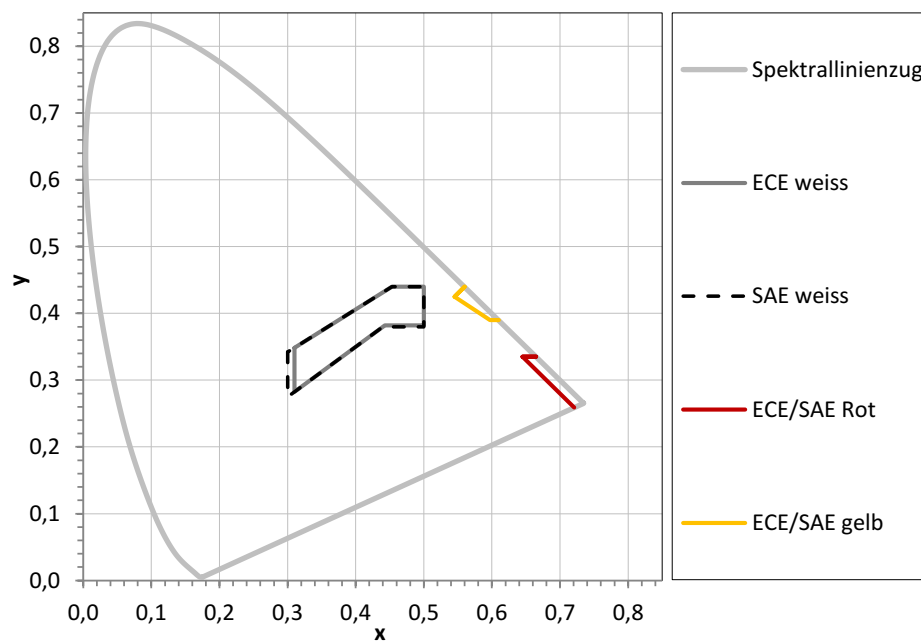
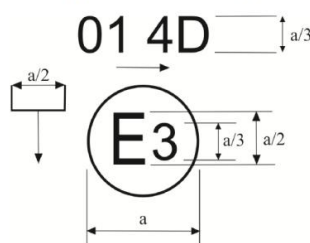


Abbildung 2.6: Darstellung der Farbgrenzen nach ECE-Regelungen R6, R7 und SAE J578 [36],[103]

Sowohl die ECE als auch die FMVSS/CMVSS basierten Gesetzgebungen schreiben Prüfzeichen auf den sichtbaren Teilen der jeweiligen Leuchtenkomponenten vor. Die gesetzlich vorgeschriebene Mindesthöhe a dieser Prüfzeichen beträgt mindestens 5 mm (siehe Abbildung 2.7(a)) [36].

Examples of arrangements of the approval marks



(a) Gesetzlich vorgeschriebene Dimension eines Typprüfzeichens nach ECE-Regelung R6 [36]



(b) Fotografische Darstellung eines Typprüfzeichens auf einer Zusatzblinkleuchte

Abbildung 2.7: Darstellung von Typprüfzeichen

Die Prüfzeichen werden mit Hilfe von Strukturen innerhalb der Außenlichtscheibe realisiert, an der das Licht zusätzlich ungewollt gebrochen wird (siehe Abbildung 2.7(b)). Für die Entwicklung von Kleinleuchten wie der Zusatzblinkleuchte und der ausgelagerten Seitenmarkierungsleuchte bedeutet dies, dass ein Großteil des Erscheinungsbildes der leuchtenden Fläche

durch das Prüfzeichen negativ beeinflusst wird. Im Hinblick auf ein optisch ansprechendes Erscheinungsbild ist es notwendig, das Prüfzeichen einer Leuchte so zu positionieren, dass es einem Beobachter nicht auffällt und somit auch nicht stört.

Die Erfüllung der gesetzlichen Anforderungen erfolgt mit Hilfe von Lichtkomponenten an der Front, an den Seiten und am Heck eines Fahrzeugs. In Abbildung 2.8 sind alle elektrisch betriebenen Lichtkomponenten und die Lichtfunktionen an einer Skizze eines BMW 6ers Coupés zu sehen.

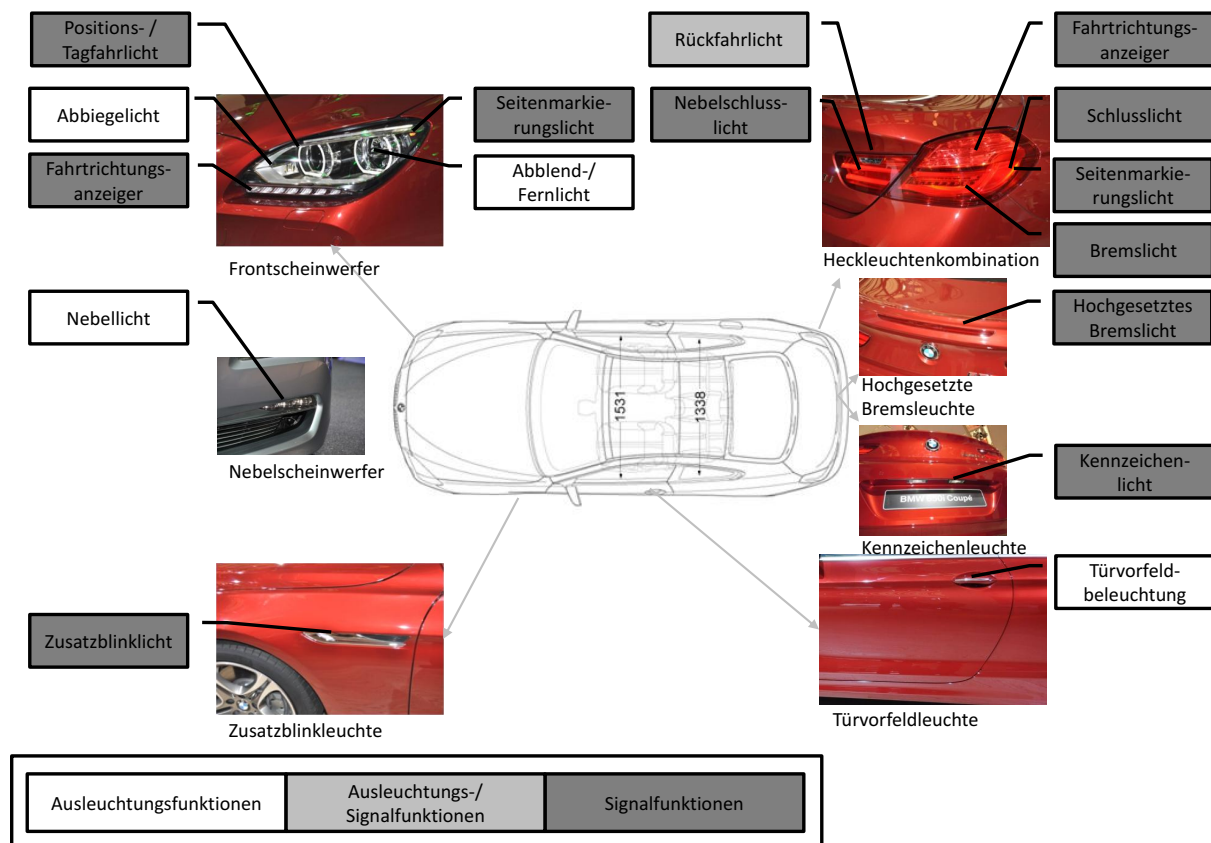


Abbildung 2.8: Lichtkomponenten an einem Fahrzeug

An der Front des Fahrzeugs sind die Frontleuchtenkombination (FLK) und die Nebelscheinwerfer (NSW) verbaut. Am Heck des Fahrzeugs befinden sich die Heckleuchtenkombination (HLK), die Kennzeichenleuchte (KZL) und die hochgesetzte Bremsleuchte (HBL). Seitlich am Fahrzeug sind die Zusatzblinkleuchte (ZBL), die Türgriffbeleuchtung (OVT) und gegebenenfalls die für den US-Markt benötigte Seitenmarkierungsleuchten (SML) positioniert. Innerhalb der FLK und der HLK sind mehrere Leuchten integriert, die zur Realisierung verschiedener Lichtfunktionen verwendet werden. So umfasst z.B. die FLK u.a. Leuchten für das Abblend- (ABL), Fern- (FL), Tagfahr- (TFL), Positions- (PO) und Abbiegelicht (ABBL) sowie den Fahrtrichtungsanzeiger (FRAZ). Je nach Konzept können einzelne Leuchten aus der FLK oder der HLK ausgelagert

sein. In einigen Fahrzeugen wird das Abbiegelicht in einer vom FLK ausgelagerten Leuchte im Stoßfänger verbaut.

2.1.2 Funktionale Anforderungen

Verschiedene Untersuchungen von Kaltenbach, Mortimer, Schmidt-Clausen, u. a. haben gezeigt, dass die gesetzlichen Anforderungen bei unterschiedlichen Umweltbedingungen (Tag - Nacht) nicht ausreichend sind, um die Erkennbarkeit zu gewährleisten [71], [95], [96], [53], [12]. Auch andere Umweltbedingungen wie Schnee, Nebel, Regen und Gischt verschlechtern die Sichtbarkeit von Signalleuchten deutlich.

Mit Hilfe seiner Untersuchungen konnte Ripperger belegen, dass die Erkennbarkeit bzw. der Helligkeitseindruck einer Signalleuchte nicht, wie von den gesetzlichen Regelungen vorgegeben, von der Lichtstärke, sondern von der mittleren Leuchtdichte abhängt [90].

Auf Basis einer homogenen Leuchtdichteverteilung sind in Abbildung 2.9 nach Kaltenbach die optimalen Leuchtdichten zur Erkennung der Signalfunktion Schlusslicht in Abhängigkeit der Umgebungsleuchtdichte dargestellt. Die Fläche der Signalfunktionen hatte in Kaltenbachs Versuchsaufbau eine Größe von 625 mm^2 . Über die Größe der Lichtaustrittsflächen und dem gesetzlich vorgeschriebenen Lichtstärkebereich konnte Kaltenbach für seinen spezifischen Versuchsaufbau die resultierenden gesetzlich zulässigen Leuchtdichten bestimmen, die in Abbildung 2.9 grau unterlegt sind [53].

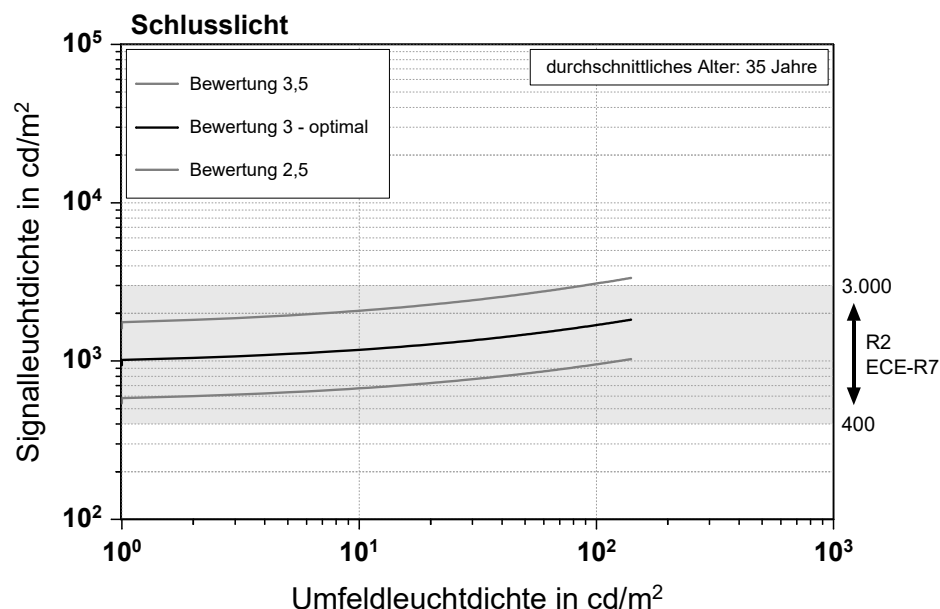


Abbildung 2.9: Optimale Signalleuchtdichte eines Schlusslichts in Abhängigkeit der Umfeldleuchtdichte nach Kaltenbach [53]

Am Beispiel des Schluss- und Bremslichts sowie des Fahrtrichtungsanzeigers konnte Kaltenbach darstellen, dass die gesetzlichen Anforderungen in Abhängigkeit der Umgebungsleuchtdichte tagsüber nicht ausreichend für eine optimale Sichtbarkeit der Signalfunktionen sind. Für eine optimale Erkennbarkeit (funktionale Anforderung) ist es notwendig, einen größeren technischen Aufwand als für die Erfüllung der gesetzlichen Anforderungen zu betreiben.

Armbruster konnte in weiteren Untersuchungen empirisch ermitteln, dass inhomogene Signal-leuchten mit mehreren Punktlichtquellen im Gegensatz zu homogenen Signalleuchten unter der Voraussetzung der gleichen mittleren Leuchtdichte unterschiedlich hell empfunden werden. Um die negative Wirkung auf die Erkennbarkeit einer inhomogenen Leuchtdichteverteilung im Vergleich zu einer homogenen beschreiben zu können, hat Armbruster mit Formel 2.1 eine Kompensationsleuchtdichte L_{komp} beschrieben [6]. Zur Bestimmung werden die homogene mittlere Leuchtdichte L_{hom} , die leuchtende Fläche A sowie der mittlere Radius r und die Anzahl n der Punktlichtquelle verwendet.

$$L_{komp} = \frac{L_{hom} \cdot A}{\pi \cdot r^2 \cdot n} \quad (2.1)$$

Die Interpretation der von Armbruster vorgeschlagenen Gleichung 2.1 führt zu dem Schluss, dass inhomogene leuchtende Signalfunktionen aus mehreren punktförmigen Lichtquellen im Vergleich zu homogen leuchtenden Signalfunktionen (beide mit der Leuchtdichte L_{hom}) deutlich schlechter wahrgenommen werden können. Diese Aussage konnte durch Kaltenbach in Feldversuchen mit realen Heckleuchten bestätigt werden [53].

2.1.3 Ästhetische Anforderungen

Neben der Etablierung von Lichtikonen wird von Seiten des Designs als ästhetische Anforderungen ein homogenes Erscheinungsbild der Signalleuchten gefordert, welches sich ebenfalls positiv auf die Verkehrssicherheit auswirken kann (siehe Kapitel 2.1.2).

Der Begriff der Homogenität kommt aus dem Griechischen von den Begriffen *homoios* - gleich und *gígnomai* - entstehen [63]. Hiermit wird die Gleichheit einer Eigenschaft von Objekten, Erscheinungen oder Elementen über ein gesamtes System beschrieben. In nahezu allen technischen Bereichen ist die Homogenität ein Gütemerkmal für die Qualität eines Produktes oder einer technischen Einrichtung. Sie wird in der Regel als notwendige Eigenschaft für ein qualitativ hochwertiges und attraktives Produkt angesehen. In einer BMW internen Untersuchung zum Thema LED-Technik im Automobilbau konnte anhand von Probandenbefragungen ermittelt werden, dass homogen erscheinende Lichtfunktionen von Kunden aus ästhetischen Gründen bevorzugt werden [60].

Im Zusammenhang der Fahrzeugbeleuchtung ist Homogenität eine mehrdimensionale Erscheinung, die von einem Beobachter visuell wahrgenommen und bewertet wird. Die Homogenität hängt hierbei auf der obersten Ebene von einem gleichmäßigen örtlichen und zeitlichen Erscheinungsbild ab, welches auf der unteren Ebene differenziert in Bezug auf die Helligkeit und die Farbe bewertet werden kann.

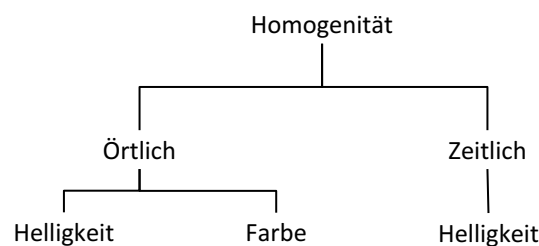


Abbildung 2.10: Definition der Homgnitätsdimensionen

Laut dem Objektivierungsprozess wird eine Lichtfunktion nur dann als inhomogen bewertet, wenn drei Voraussetzungen erfüllt sind:

1. Die Leuchtdichte- bzw. Farbunterschiede müssen zeit- und ortsauflösend messtechnisch detektierbar sein.
2. Die Leuchtdichte- bzw. Farbunterschiede müssen für den Beobachter wahrnehmbar sein.
3. Die Leuchtdichte- bzw. Farbunterschiede müssen einem subjektiven Bewertungsmaßstab oder mindestens dem Grenzwert einer objektivierten Gütekennzahl entsprechen.

Eine Trennung zwischen einem menschlichen Beobachter und einer optischen Messtechnik ist sinnvoll, da je nach eingesetzter Messtechnik feinere bzw. grobere Unterschiede der Leuchtdichte, der Farben und der zeitlichen Wiederholung als durch das menschliche Auge detektierbar sind.

Der Fokus dieser Arbeit liegt auf der ortsauflösenden Homogenität von Signalleuchten im Hinblick auf Helligkeit und Farbigkeit. Weitere Informationen zu zeitlichen Inhomogenitäten, wie ein Flimmern einer Leuchte oder ein Perlschnureffekt, können unter anderem aus Kaltenbach und Schroedter entnommen werden [53], [100].

Herstellerübergreifend ist ein homogenes Erscheinungsbild von Signalleuchten gefordert, jedoch besitzt jeder Fahrzeughersteller seine eigene Philosophie hinsichtlich der Homogenitätsbewertung. Einige Hersteller, unter anderem Volkswagen (siehe Abbildungen 1.1 und 1.2), verfolgen das technische Konzept ein Erscheinungsbild mit mehreren einzelnen Punktlichtquellen in einer Signalleuchte zu erzeugen. Je nach Beobachtungsentfernung wirkt das Erscheinungsbild unterschiedlich. Bei hohen Beobachtungsentfernung von mehr als 50 m kann ein flächiges und bei niedrigen Entfernungen ein punktförmiges Signalbild erzeugt werden. Die Beobachtungsposition (Entfernung und Winkel) sowie die Art der Inhomogenität (im weiteren Verlauf der Dissertation Inhomogenitätsklasse genannt) kann einen entscheidenden Einfluss auf die Homogenitätsbewertung haben.

Im Gegensatz zu anderen Herstellern, wie Volkswagen oder Mercedes, verfolgt BMW die Philosophie, dass die Homogenität nicht nur in hohen Entfernungen, sondern auch bei kurzen Beobachtungsentfernungen unter weiten Beobachtungswinkeln gegeben ist. Wie diese Entfernungen für die typischen Kundenbewertungsszenarien definiert sind, wird in Kapitel 2.2.2 detailliert erläutert.

Die Signalleuchten sollen in Bezug auf Helligkeit und Farbe stets ein gleichmäßiges Erscheinungsbild besitzen. Eine detaillierte Ausarbeitung von verschiedenen Inhomogenitätsklassen und deren charakteristischen Eigenschaften ist in Kapitel 2.2.2 beschrieben.

2.2 Inhomogenes Erscheinungsbild von lichttechnischen Fahrzeugkomponenten

2.2.1 Klassifizierung von Inhomogenitäten

Durch die Begutachtung einer Anzahl von 40 Fahrzeugbeleuchtungskomponenten in allen technischen Ausprägungen konnten folgende Erkenntnisse zu der Homogenität einer zeit- und ortsauflösenden Lichtverteilung gewonnen werden:

1. Es sind verschiedene Inhomogenitätsklassen definierbar.
2. Nicht jede Inhomogenitätsklasse liegt bei jeder technischen Ausführung einer Lichtkomponente, bei jeder Funktion oder jeder Lichtverteilung vor.
3. Jede Inhomogenitätsklasse wird von Beobachtern differenziert bewertet.

Auch wenn die Grundvoraussetzungen für ein inhomogenes Erscheinungsbild gegeben sind, muss eine Lichtfunktion nicht zwangsläufig als qualitativ minderwertig bewertet werden. Dies ist durch das subjektive Empfinden und den Bewertungsmaßstab eines Individuums bedingt. So kann ein gleichmäßiger Helligkeitsverlauf entlang eines Lichtleiters oder eine gleichmäßige Struktur trotz eines wahrnehmbaren und messtechnisch erfassbaren Helligkeitsunterschieds von einem Beobachter als qualitativ hochwertig beziehungsweise als nicht störend bewertet werden.

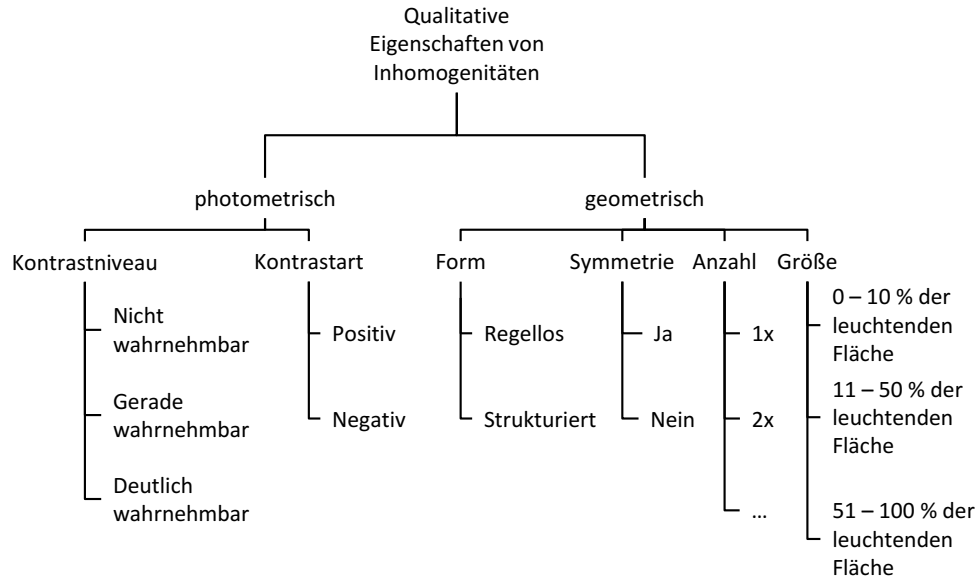


Abbildung 2.11: Qualitative Eigenschaften von Inhomogenitäten

Für eine vollständige Erfassung und Eingruppierung der Inhomogenitäten wird im Rahmen dieser Arbeit eine Klassifikation durchgeführt. Eine Definition von Klassen erfolgt zunächst qualitativ anhand von geometrischen und photometrischen Merkmalen. Mit den in Abbildung 2.11

gezeigten Merkmalen können verschiedene Arten von Inhomogenitäten qualitativ beschrieben und definiert werden.

Das Kontrastniveau wird zwischen nicht wahrnehmbar bis zu deutlich wahrnehmbar differenziert und ist unter anderem von Randbedingungen wie der Umgebungsleuchtdichte, Kontrastpolarität etc. abhängig (vgl. Kapitel 2.4). Die Kontrastpolarität beschreibt die Eigenschaft einer Inhomogenität in Form eines Hell-Dunkel oder eines Dunkel-Hell Kontrasts (Positiv- und Negativkontrast, siehe Abbildung 2.49). Die geometrische Ausdehnung einer Inhomogenität kann einen starken Einfluss auf die Form- und Störimpfindung nehmen (vgl. Kapitel 2.4.5). Daher werden Inhomogenitäten auf Grund ihrer Form, Symmetrie, Größe sowie der Anzahl unterschieden. Es kann die Annahme getroffen werden, dass eine regellose Inhomogenität in Form eines unförmigen Flecks einen anderen Einfluss auf die Störimpfindung nimmt als eine lichtleiterbedingte Prismenstruktur. Aus diesem Grund erfolgt im Rahmen dieser Arbeit eine Abgrenzung zwischen symmetrischen und unsymmetrischen Inhomogenitäten. Für die Beschreibung der qualitativen Eigenschaften von Inhomogenitäten werden zuletzt die Annahmen getroffen, dass die Anzahl und die Größe der Inhomogenitäten unabhängig voneinander Einfluss auf die Homogenitätsbewertung nehmen.

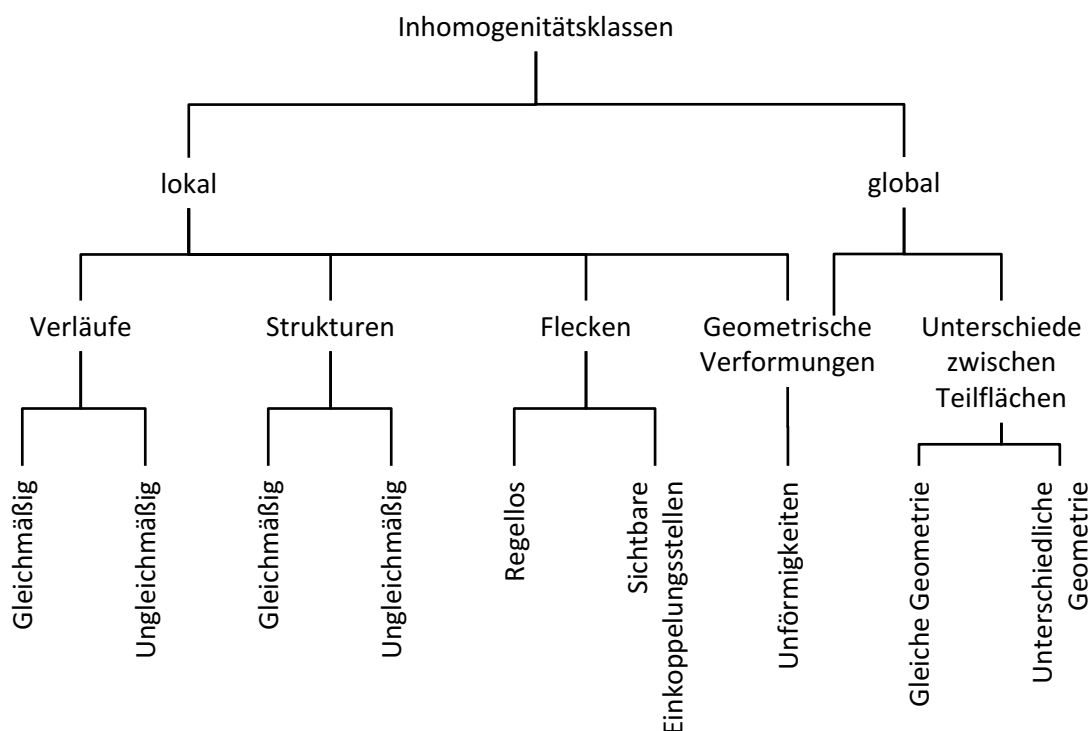


Abbildung 2.12: Örtliche Inhomogenitätsklassen in verschiedenen technischen Ausprägungen

Das Ergebnis der umfassenden Klassifizierung ist in Abbildung 2.12 dargestellt. Es wird bei den örtlichen Inhomogenitäten der Leuchten zwischen den Oberklassen Verläufe, Strukturen, Flecken, geometrische Verformungserscheinungen und Unterschiede zwischen Teilflächen differenziert. Bis auf die letztgenannte Inhomogenitätsklasse treten alle anderen Inhomogeni-

tätsformen innerhalb von einzelnen leuchtenden Teilflächen des gesamten Lichtsystems auf. Daher werden diese Inhomogenitätsklassen als lokale Inhomogenitäten definiert. Unterschiede zwischen angrenzenden lichttechnischen Bereichen werden als globale Inhomogenitäten definiert. Die Oberklasse der geometrischen Verformung stellt einen Sonderfall dar, da je nach Ausprägung der Homogenität sowohl das globale und als auch das lokale Erscheinungsbild der Lichtfunktion betroffen ist. Alle genannten Klassen können getrennt voneinander und in Kombination auftreten. Aus Gründen der Übersicht sind in Abbildung 2.12 die Klassen getrennt voneinander aufgeführt.

Die Oberklasse der Verläufe beschreibt den stetigen Abfall der Helligkeit innerhalb einer leuchtenden Fläche. Der Abfall der Helligkeit kann mit Hilfe des Gradienten dargestellt werden. Strukturen hingegen können qualitativ durch einen stetigen Helligkeitswechsel mit Hilfe der Raumfrequenz nach einer Fourier-Transformation der Bilddaten definiert werden. Bei einer gleichmäßigen Struktur verändert sich der Mittelwert innerhalb der leuchtenden Fläche nicht. Beide Merkmale sind durch die Leuchtdichtemessung der BMW 3er Heckleuchte (Baujahr 2010) aus Abbildung 2.13 veranschaulicht.

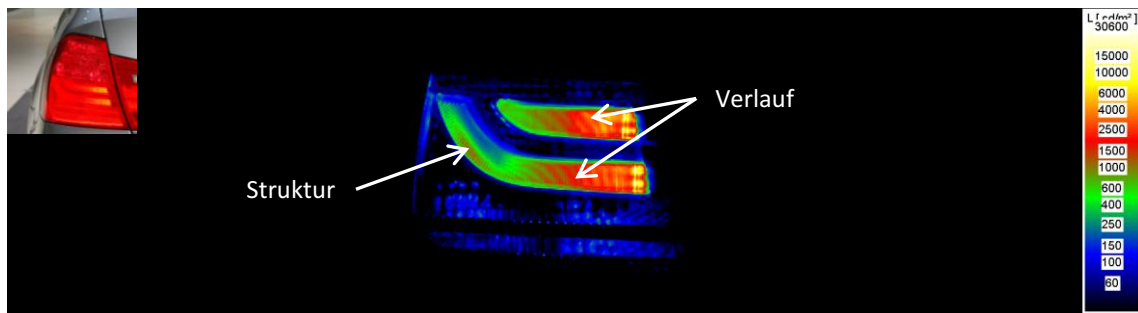


Abbildung 2.13: Ortsauflösende Leuchtdichteverteilung von Verläufen und Strukturen am Beispiel einer BMW 3er Heckleuchte (Baujahr 2010)

Sowohl die Klasse der Verläufe als auch die Klasse der Strukturen sind in gleichmäßige und ungleichmäßige Verläufe bzw. Strukturen untergliedert. Ein ungleichmäßiger Helligkeitsverlauf ist so definiert, dass der Gradient des Verlaufs nicht gleichbleibend ist, sondern sich sprunghaft ändert. Analog dazu kann eine ungleichmäßige Struktur durch ein multifrequentes Spektrum beschrieben werden.

Des Weiteren wird zwischen regellosen und durch Lichtquellen bedingte Flecken differenziert, welche in Abbildung 2.14 gezeigt werden. Flecken beider Klassen nehmen unterschiedliche Dimensionen und Formen an. Regellose Flecken können mehrfach an beliebigen Orten der leuchtenden Fläche in Erscheinung treten (vgl. Abbildung 2.14). Lichtquellen basierte Flecken sind sichtbare Einkoppelstellen in Lichtleitern.

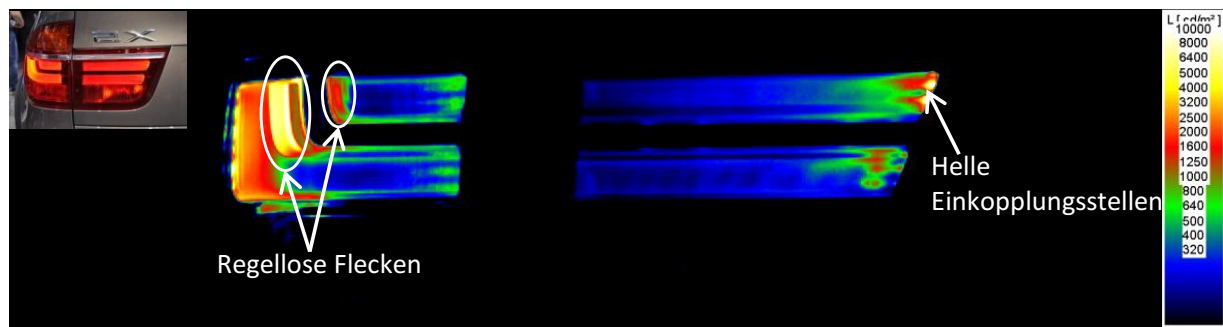


Abbildung 2.14: Ortsauflösende Leuchtdichteverteilung von Flecken am Beispiel einer Heckleuchte

Die Klasse der geometrischen Verformungen mit der Unterklasse der Unförmigkeiten beschreibt die Variation der Geometrie einer leuchtenden Fläche zwischen dem Kalt- und Warmerscheinungsbild. Veranschaulicht wird dies am Beispiel des in Abbildung 2.15 dargestellten Lichtleitrings. Das Warmerscheinungsbild des Rings ist im Hinblick auf die Homogenität negativ durch die Ausbauchung an den beiden Schenkeln des Lichtleitrings gezeichnet. Im Kalterscheinungsbild hingegen wirkt der Ring analog zu seiner Geometrie rund (mit einer konstanten Lichtleiterbreite). Das Phänomen der geometrischen Unförmigkeit kann sowohl auf lokaler als auch globaler Betrachtungsebene in Erscheinung treten.

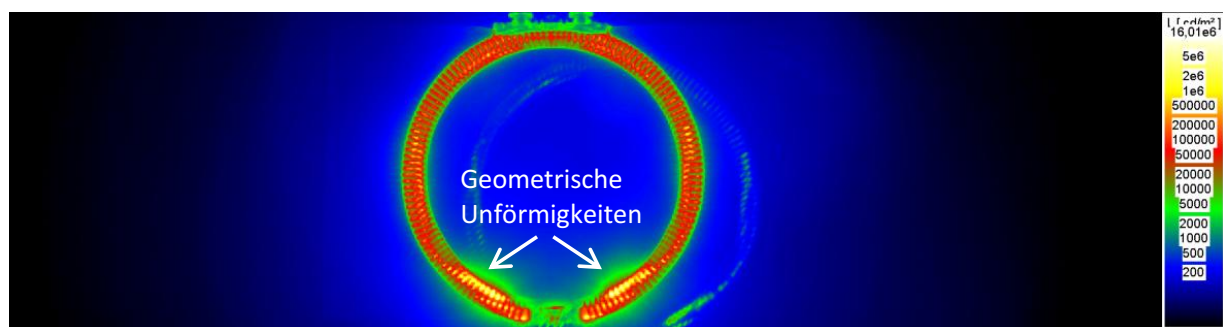


Abbildung 2.15: Ortsauflösende Leuchtdichteverteilung von einer geometrischen Unförmigkeit am Beispiel eines Lichtleitrings

Eine weitere globale Inhomogenitätsklasse stellt die Klasse „Unterschiede zwischen abgegrenzten Teilflächen“ dar. Mit dieser Klasse werden Inhomogenitäten in Form von verschiedenen mittleren Helligkeiten zwischen Teilflächen wie zum Beispiel Lichtleitern innerhalb einer Leuchte oder Helligkeitsunterschiede zwischen Komponenten wie zum Beispiel zwischen zweiteiligen Heckleuchten beschrieben (siehe Abbildung 2.16). Als ein weiteres Beispiel aus der Praxis kann hierfür die Bewertung des Erscheinungsbilds zwischen einem ringförmigen Lichtleitring und einem stabförmigen Lichtleiter angeführt werden, die bei Fahrzeugen der BMW AG für die Positionslichtfunktion eingesetzt wird. Bei der Betrachtung von globalen Inhomogenitäten sollte neben dem Abstand der Teilflächen zueinander auch deren Geometrie berücksichtigt

werden. Dies ist durch die menschliche Fähigkeit der Formempfindung begründet (vgl. Kapitel 2.4.5). Da der Mensch Formen differenziert bewertet, wird zwischen Klassen mit gleicher und ungleicher Geometrie unterschieden.

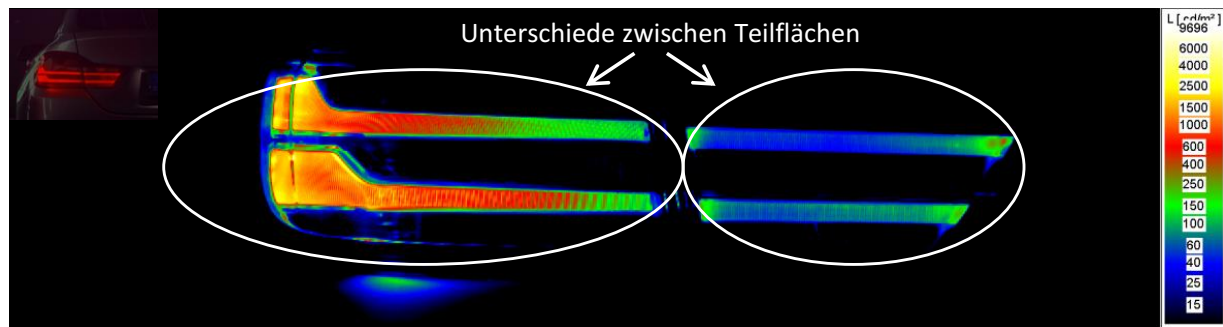


Abbildung 2.16: Ortsauflösende Leuchtdichteverteilung von Unterschieden zwischen Teilflächen

Alle zuvor genannten Inhomogenitätsklassen haben sich auf die Homogenitätsbewertung im Hinblick auf die Helligkeitsbewertung bezogen. Für eine farbliche Homogenitätsbewertung kann aus den vermessenen Leuchten die Erkenntnis gewonnen werden, dass für farbliche Homogenität nur die Klassen der Verläufe und Unterschiede zwischen abgegrenzten Teilflächen relevant sind. Zudem ist es ersichtlich, dass farbliche Inhomogenitäten in der Regel nur bei weißen Lichtfunktionen wie dem Begrenzungs-, Tagfahr-, Rückfahrlicht etc. in Erscheinung treten, da die Bandbreite der Farbvalenzen der verfügbaren Lichtquellen innerhalb des wahrnehmbaren Farbunterschiedsbereichs liegen. Rote sowie gelbe Lichtfunktionen sind in diesem Hinblick unkritischer, da für diese Farbvalenzen die jeweiligen Fertigungstoleranzen der Lichtquellen so gering sind, dass Farbunterschiede für den Menschen nicht wahrnehmbar sind.

2.2.2 Bewertungsszenarien von Inhomogenitäten im Alltag

Lichttechnische Fahrzeugkomponenten sind im Alltag für Personen in vielen Situationen erlebbar. Hierbei werden die Lichtfunktionen hinsichtlich des Erscheinungsbilds bewusst und unbewusst bewertet. In einigen Situationen ist die Wahrscheinlichkeit einer bewussten Homogenitätsbewertung sehr hoch, da z.B. eine Betrachtung der Lichtkomponenten ohne eine zeitliche Einschränkung sowie in einer geringen Distanz ermöglicht wird. Des Weiteren kann durch die Aktivierung einer Lichtfunktion die Aufmerksamkeit gesteigert und gezielt auf die Komponenten gelenkt werden.

Für die Bewertung der Homogenität werden drei typische Situationen definiert, welche in Abbildung 2.17 dargestellt sind. Es handelt sich hierbei um die Betrachtung von Fahrzeugen mit eingeschalteten Lichtkomponenten in Verkaufsräumen, im stehenden Straßenverkehr sowie beim Ent- und Verriegeln des Fahrzeugs. Für jede dieser Bewertungsszenarien gelten

unterschiedliche Rahmenbedingungen. Diese können hauptsächlich durch die Adaptation, die funktionale Ansteuerung und die Betrachtungsentfernung sowie den -winkel beschrieben werden.

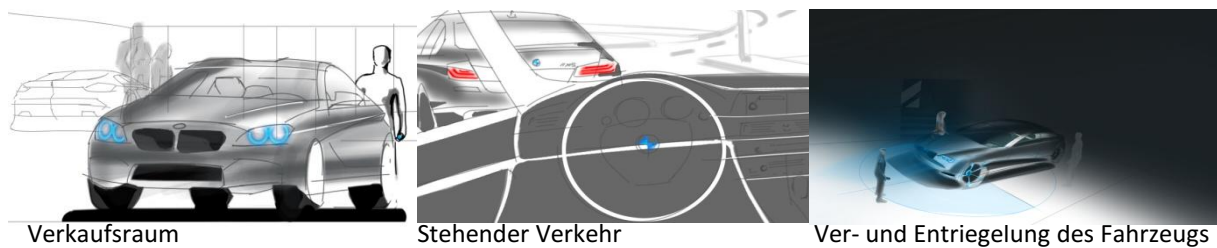


Abbildung 2.17: Veranschaulichung der alltäglichen Bewertungsszenarien der Homogenität [15]

Alle Daten zu den verschiedenen alltäglichen Bewertungsszenarien hinsichtlich der Funktionsausprägung, der Aktivierungsbedingung, der Umgebungshelligkeit, der Beobachtungsentfernung sowie dem horizontalen und vertikalen Winkel sind in Tabelle 2.1 zusammengefasst. Die Herleitung der Daten ist Anhang B zu entnehmen.

Tabelle 2.1: Parameter der Homogenitätsbewertungsszenarien

	Verkaufsraum	Stehender Straßenverkehr	Ent-/Verriegelung des Fahrzeugs
Funktionsausprägung tags	Im Regelfall nur Leuchten für das Positionslicht aktiv	Im Regelfall nur Leuchten für das Tagfahrlicht aktiv	Im Regelfall nur Leuchten für das Positionslicht aktiv
Funktionsausprägung nachts inklusive Dämmerung	Im Regelfall nur Leuchten für das Positionslicht aktiv	Im Regelfall nur Leuchten für das Fahrlicht aktiv	Im Regelfall nur Leuchten für das Positionslicht aktiv
Beobachtungsentfernung	0,25 m bis 10 m	2,23 m bis 4,44 m	0,25 bis 10 m
Horizontaler Beobachtungswinkel	$\pm 90^\circ$	Rechte HKL: $-63,3^\circ$ bis $39,5^\circ$ Linke HKL: $-49,5^\circ$ bis $57,3^\circ$	$\pm 90^\circ$
Vertikaler Beobachtungswinkel	0° bis 60°	$-11,1^\circ$ bis 24°	0° bis 60°

2.3 Technische Ursachen von Inhomogenitäten

Für die Ermittlung von Ursachen von Inhomogenität bei Helligkeits- und Farbunterschieden wird eine Wirkkettenanalyse durchgeführt. Bei der Wirkkettenanalyse wird die zeitliche Abfolge des Produktentstehungsprozesses von der Konzept/Entwicklungs- über die Produktions- bis hin zu der Alterungsphase betrachtet. In Abbildung 2.18 sind diese Einflussgrößen gegliedert in Anforderung, Konzept/Entwicklung, Produktion sowie Alterung dargestellt.

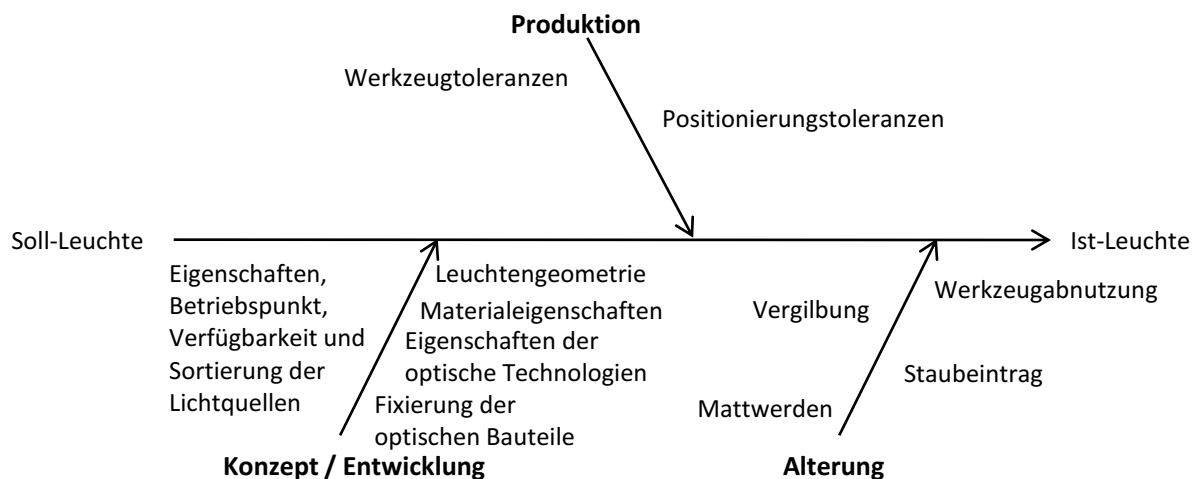


Abbildung 2.18: Einflussfaktoren für die Entstehung von Inhomogenitäten

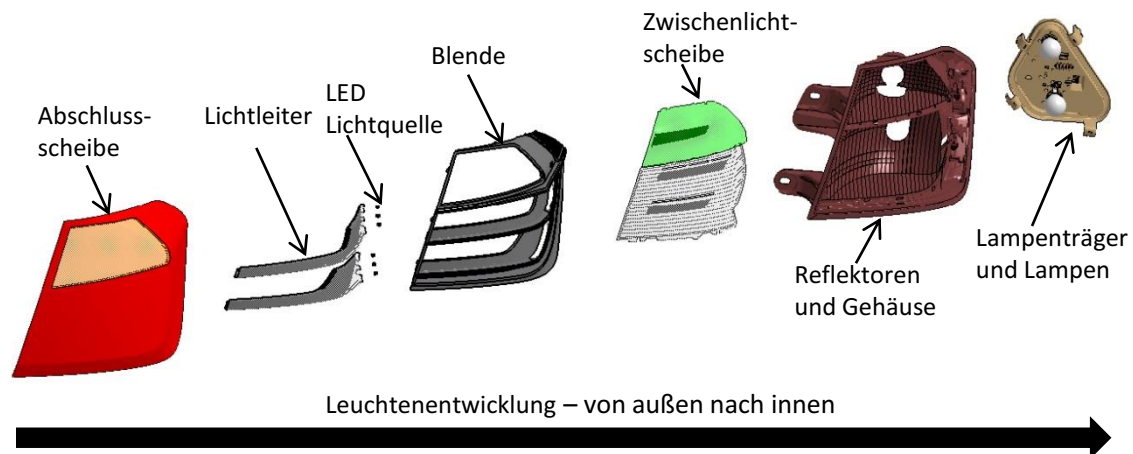


Abbildung 2.19: Explosionsdarstellung einer Heckleuchte am Beispiel einer BMW 3er Heckleuchte (Baujahr 2012)

Da eine Leuchtenentwicklung stets von außen nach innen erfolgt, werden in Abschnitt 2.3.1 technische Ursachen von Inhomogenitäten ausgehend von der äußeren Geometrie bis zur Lichtquelle detailliert erläutert (siehe Abbildung 2.19). Anschließend erfolgt in Abschnitt 2.3.2 eine Ursachenanalyse für Inhomogenitäten, die während der Leuchtenproduktion auftreten können. Abschließend werden in Abschnitt 2.3.3 Alterungserscheinungen dargestellt, die

ebenfalls nach der Produktion der Leuchte zu einem inhomogenen Erscheinungsbild führen können.

2.3.1 Leuchtenkonzept

2.3.1.1 Geometrie der Leuchte

Die Geometrie von optischen Systemen nimmt einen entscheidenden Einfluss auf die Homogenität von Signalleuchten. Die L-förmige Schlusslichtikone und die ringförmigen Tagfahrlichtikonen von BMW stellen hohe Anforderungen an die lichttechnische Auslegung der optischen Flächen. Dieser Designanspruch muss unabhängig von der eingesetzten optischen Technologie, Anzahl und Positionierung der Lichtquellen umgesetzt werden. In vielen Fällen ist aus kosten- und bauraumbedingten Gründen nur eine Lichtquelle vorgesehen. Daher gibt es im Hinblick auf eine gute Homogenität bei allen eingesetzten optischen Systemen geometrisch bedingte Richtlinien, die zu beachten sind. Dazu gehört, dass gewisse Radien, Krümmungen und Ausdehnungen innerhalb eines Systems nicht überschritten werden dürfen.

Wird auf Grund von verschiedenen Anforderungen eine L-förmige Schlusslichtikone in Verbindung mit einer einzigen Lichtquelle gefordert, verschlechtern sich die Effizienz des Systems und die Homogenität je stärker der Reflektor von einer radialen Symmetrie abweicht. Analog dazu zeigt sich bei Lichtleitern, dass bei zu engen Radien das Licht ungewollt ausgekoppelt wird. In der Regel werden in der KFZ-Beleuchtung Lichtleiter aus Polymethylmethacrylat (kurz PMMA) verwendet. PMMA besitzt einen Brechungsindex von ca. 1,49 [91]. Interne BMW Erfahrungen mit Lichtleitern aus verschiedenen Fahrzeugprojekten haben gezeigt, dass Biegungsradien bei Lichtleitern mit einem Durchmesser von 8 mm mindestens 20 mm betragen müssen.

Die Gestaltung der Geometrie kann bei der Verwendung von Lichtleitsystemen ebenfalls Auswirkungen auf die Erscheinung in Form von Helligkeit und Farbe haben, da die Lichtintensität beim Durchgang durch den Lichtleiter vom wellenlängen- und werkstoffabhängigen Absorptionskoeffizient ϵ_λ und der Länge d_L des Lichtleiters abhängt [25]. Die Eigenschaft der Absorption von Licht innerhalb eines Materials wird Extinktion E_λ genannt und beschreibt das logarithmierte Verhältnis zwischen der ausgestrahlten und eingestrahlten Strahlung (S_A und S_E) durch ein Medium (siehe Formel 2.2).

$$E_\lambda = \lg \left(\frac{S_A}{S_E} \right) = \epsilon_\lambda \cdot d_L \quad (2.2)$$

Am Beispiel der BMW 5er Frontleuchte aus dem Baujahr 2012, die zwei unterschiedlich große Lichtleiterringe besitzt, werden die Auswirkungen der Extinktion untersucht. In Abbildung 2.20 sind Farborte von zwei LEDs (A und B) mit und ohne Kombinationen von Lichtleiterringen mit einem Umfang von x und y cm (äußerer Ring (ÄR), innerer Ring (IR)) dargestellt. Dazu wurden

die verschiedenen Konfigurationen analog der in Kapitel 4.1.3 vorgestellten Methode spektral vermessen.

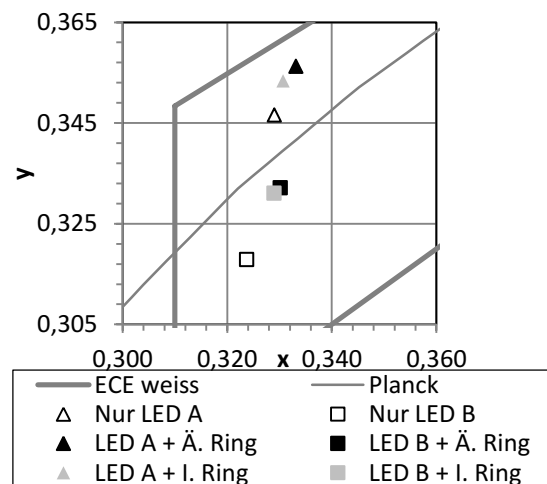


Abbildung 2.20: Farbverschiebung durch Lichtleitersysteme

Durch Abbildung 2.20 kann gezeigt werden, dass die ursprünglichen Farbwertanteile der LEDs in Verbindung mit den Lichtleitringen in positive x- oder y-Farbwertanteile verschoben werden. Für einen Beobachter bedeutet dies, dass sich das Erscheinungsbild des Systems auf Grund der Lichtleitringe in Richtung gelb verschiebt und die blaue Farbvalenz absorbiert wird. Durch die Verwendungen derselben LED in unterschiedlichen Lichtleitringen kann gezeigt werden, dass wegen unterschiedlichen Geometrien Mehrfarbigkeiten im Scheinwerfer entstehen können, die einen negativen Einfluss auf das farbige Erscheinungsbild eines Scheinwerfers haben können.

Zusätzlich kann bei stabförmigen Lichtleitern auf Grund einer einseitigen Lichteinspeisung und der Absorption entlang eines Lichtleiters zusätzlich der Effekt eines farbigen Verlaufs in Form von einer bläulich bis hin zu einer gelblich wirkenden Erscheinung auftreten.

2.3.1.2 Optische Technologien

Optische Systeme haben verschiedene Aufgaben in der automobilen Lichttechnik. Mit optischen Systemen kann das Licht gebündelt und gezielt in verschiedene Richtungen gelenkt werden. So können die gesetzlichen Anforderungen im Hinblick auf eine winkelabhängige Lichtstärkeverteilung erfüllt werden. Daher ist es erforderlich, den eingesetzten Lichtstrom primär für die Erfüllung der gesetzlichen Anforderungen zu verwenden. Die Optimierung der ästhetischen Anforderungen wie die Homogenität in jeglichen Beobachtungsrichtungen stellt aus Sicht des Gesetzgebers nur ein sekundäres Ziel dar. Dennoch können mit Hilfe von optischen Systemen aus punktförmigen Lichtquellen leuchtende Flächen kreiert werden, mit denen die für das Design enorm wichtige Formensprache realisiert wird.

Für die Auslegungen von Lichtfunktionen werden verschiedene Technologien eingesetzt. Die geläufigsten sind: Reflektor-, Refraktions-, Lichtleiter- und Funktionsoptikfreiesysteme. In einer Lichtkomponente im Automobil werden die genannten Technologien in jeder denkbaren Kombination eingesetzt. Alle Technologien besitzen unterschiedliche lichttechnische Eigenschaften. Im Verbund nehmen die einzelnen Optiken daher einen großen Einfluss auf das homogene Erscheinungsbild, die Effizienz und die Kosten einer lichttechnischen Komponente.

Funktionsoptikfreie Abschlussscheibe: In der Regel sind heutige Abschlussscheiben von Front- und Heckleuchten funktionsoptikfrei. Durch diese Abschlussscheiben soll das emittierte Licht der Lichtkomponenten möglichst nicht zusätzlich gebrochen oder gestreut werden. Durch die Verwendung von funktionsoptikfreien Abschlussscheiben besteht für das Design die Möglichkeit, Leuchten ein dreidimensionales Erscheinungsbild mit einer Tiefenwirkung zu geben, da die optikfreien Scheiben eine Einsicht in die Leuchte ermöglichen (siehe Abbildung 2.21).

Durch eine Einfärbung der Abschlussscheibe kann die resultierende Farbe einer Lichtfunktion beeinflusst werden. So können Lichtfunktionen mit einer weißen Lichtquelle im Rahmen der ECE- und SAE-Normen eingefärbt werden. Die Abschlussscheibe besitzt mechanisch die Aufgabe, die Lichtkomponenten von der Umwelt abzugrenzen und die Dichtigkeit und Stabilität der Leuchte zu gewährleisten. Im Hinblick auf die Homogenität liegt der Nachteil einer optikfreien Abschlussscheibe darin, dass ohne weitere Maßnahmen eine direkte Einsicht auf die Lichtquelle ermöglicht wird.



(a) Funktionsoptikfreie Abschlussscheibe in einer BMW 5er Heckleuchte (Baujahr 2009)

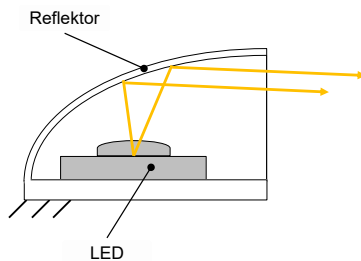


(b) Funktionsoptikfreie Abschlussscheibe in einer BMW 5er Heckleuchte (Baujahr 2007)

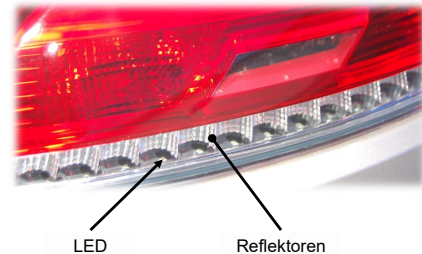
Abbildung 2.21: Funktionsoptikfreie Abschlussscheiben, Fotos entnommen aus [1]

Für die Optimierung der Homogenität ist es daher bei einem System mit einer optikfreien Abschlussscheibe ratsam, die Lichtquelle so zu positionieren, dass ein Beobachter aus keiner Beobachtungsrichtung direkt auf die Lichtquelle blicken kann. Lichttechnische Optimierungen bestehen darin, die Lichtquelle durch eine zusätzliche refraktive Zwischenlichtscheibe oder durch eine Blende zu verdecken.

Reflektoren: Reflektorsysteme sind in verschiedenen technischen Varianten ausgeführt. Diese Varianten unterscheiden sich insbesondere durch ihre geometrische Gestaltung. Nach Wördenweber [116] werden derzeit Paraboloid-, Ellipsoid- und Freiformflächen sowie Stufenreflektoren und facettierte Reflektoren oder Kombinationen in automobilen Lichtkomponenten eingesetzt.



(a) Schematische Darstellung eines Reflektionssystems



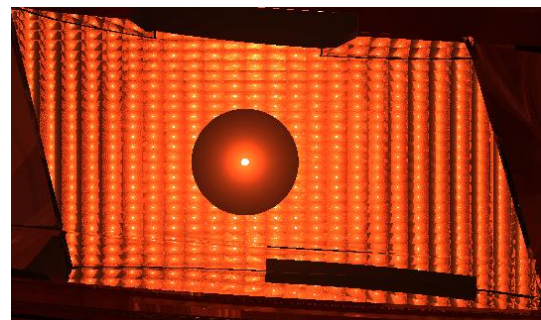
(b) Reflektionsoptik eines BMW Z4 im hinteren Fahrtrichtungsanzeiger

Abbildung 2.22: Schematische Darstellung eines Reflektionssystems (a) und Anwendung bei einem BMW Z4 (b)[101]

Reflektoren werden primär dazu genutzt, um das Licht in bestimmte Richtungen zu lenken, so dass bei einer Signalfunktion die gesetzlichen Anforderungen erfüllt werden. Ein homogen leuchtendes Erscheinungsbild eines Reflektors hängt daher stark von der Betrachtungsposition ab. Mit der Anzahl und der Tiefe der Facetten ist die Homogenität beeinflussbar. Mit einer hohen Anzahl an Facetten mit einer geringen Tiefe ist es möglich, über einen hohen Betrachtungswinkelbereich ein homogenes Erscheinungsbild zu kreieren (vgl. Abbildung 2.23).



(a) Rendering eines Schlusslichts mit einem Reflektorsystem mit 4 Zonen

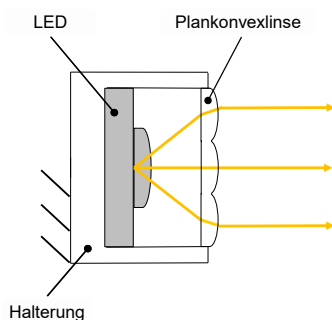


(b) Rendering eines Schlusslichts mit einem Reflektorsystem mit 15 Zonen

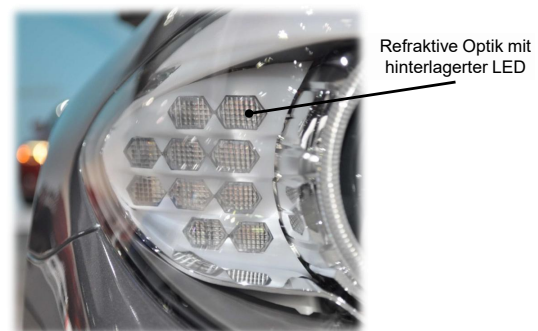
Abbildung 2.23: Auswirkung der Anzahl der Facetten auf die Homogenität

Refraktionssysteme: Refraktionssysteme sind lichtbrechende Optiken, mit denen Lichtverteilungen für Signalfunktionen ohne zusätzliche Reflektoren technisch umgesetzt werden können

[86]. Ein Vorteil dieses optischen Systems besteht darin, dass eine LED-Lichtquelle direkt hinter der Optik positioniert werden kann. So sind Lichtfunktionen in und mit geringen Bauräumen kostengünstig und kompakt umsetzbar. Als Beispiel sind hierzu unter anderem die hochgesetzte Bremsleuchte in der Dachkante oder hinter der Heckscheibe, die optische Türvorfeldbeleuchtung und die Fahrtrichtungsanzeiger in Frontleuchte oder Heckleuchte zu nennen. Eine flächige homogene Ausleuchtung ist sehr stark durch den Abstand der Lichtquelle zum Refraktions-system bestimmt. Je weiter die Lichtquelle von der Optik entfernt ist, desto besser wird das Ergebnis im Hinblick auf die Homogenität, wobei im Gegenzug die Signalwirkung auf Grund der abnehmenden Leuchtdichte verringert ist.



(a) Schematische Darstellung eines Kissenlinsensystems



(b) Kissenoptik eines Fahrtrichtungsanzeigers verschiedener BMW-Modelle

Abbildung 2.24: Kissenlinsensystem in schematischer und fotografischer Darstellung (entnommen aus [101])

Als lichtbrechende Optiken werden häufig Fresnel-, Kissen- oder Walzenoptiken eingesetzt (vgl. Abbildung 2.24). Sie bieten im Hinblick auf die Homogenität einer Signalfunktion den Vorteil, dass sie einen direkten Blick auf die punktförmige Lichtquelle verhindern. Bei einer Fresnellinse können auf Grund der Stufenform der Optik konzentrische, kreisförmige Inhomogenitäten in Erscheinung treten. Bei einer Walzenoptik äußert sich dies in Form von parallel zu den Walzen verlaufenden Helligkeitsschwankungen. Die Anzahl und Form der refraktiven Elemente beeinträchtigen daher die Homogenität einer Signalleuchte.

Lichtleitsysteme: Lichtleiter sind optische Systeme, bei denen das Prinzip der Totalreflexion ausgenutzt wird. Mit ihnen kann sowohl die Lichtquelle räumlich von der Lichtaustrittsfläche getrennt als auch geometrische Formen mit einer Dreidimensionalität verwirklicht werden [86]. Hierdurch wird dem Design eine große Gestaltungsfreiheit geliefert. Diese Technologie ermöglicht die Ikonisierung der Lichtfunktionen, welche die verschiedenen Fahrzeughersteller mehr oder weniger intensiv zur Prägung der Markenidentität nutzen.

Bei den in der Fahrzeugbeleuchtung verwendeten Lichtleitern wird das Licht über optische Strukturen gezielt aus dem Lichtleiter ausgekoppelt, um die Lichtfunktionen nach den gesetzli-

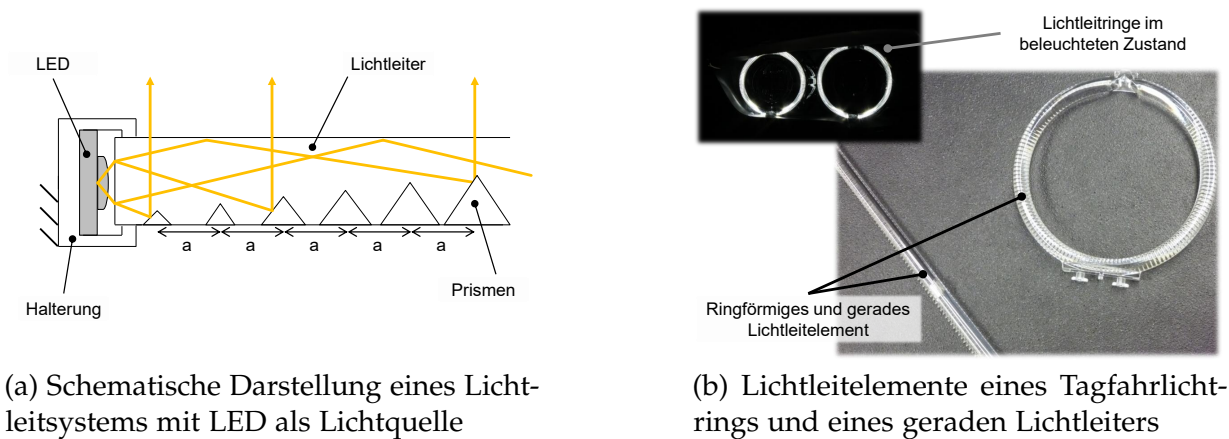


Abbildung 2.25: Lichtleitsystem in schematischer und fotografischer Darstellung

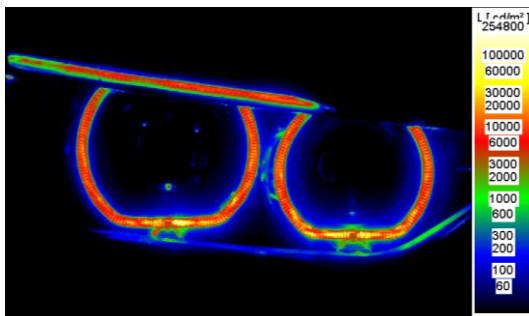
chen, aber auch den ästhetischen Anforderungen zu realisieren. Als optische Strukturen werden unter anderem im Lichtleiter auf der Rückseite Prismen oder diffus streuende Oberflächen verwendet. Durch die Prismen erhält das Erscheinungsbild eines Lichtleiters in jeder Betrachtungsposition eine feine, gleichmäßige Struktur mit Helligkeitsschwankungen (vgl. Abbildung 2.25). Daher beeinflussen Anzahl und Geometrie der Prismen stark die Homogenität. Um einen Helligkeitsabfall ausgehend von der Einspeisung entlang des Lichtleiters zu vermeiden, ist es notwendig, die Prismentiefe zu variieren. In der Regel werden die Prismen eines Lichtleiters so gestaltet, dass die Prismentiefe zur Lichtquelle hin abnimmt (siehe Abbildung 2.25).

Bei einer ungünstigen optischen Auslegung eines Lichtleiters in Verbindung mit LEDs können an den Einkoppelstellen starke lokale Leuchtdichten auftreten, die das Erscheinungsbild des Lichtleiters inhomogen wirken lassen. Dies kann durch optische Reflexionen oder direkte Einblicke auf die Lichtquellen bedingt sein, die nicht beachtet bzw. unterschätzt oder auch nicht im Vorfeld simulierbar waren.

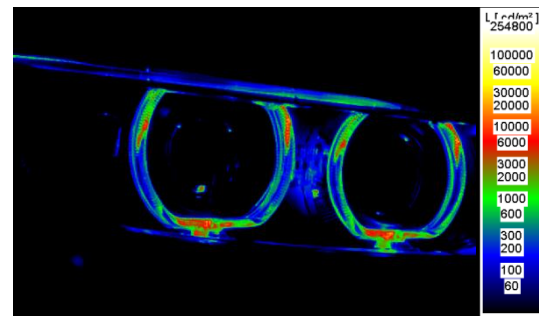
Um diesen Schwierigkeiten entgegen zu wirken, gibt es verschiedene Möglichkeiten. Über eine zusätzliche Kollimatoroptik kann das Licht so gebündelt werden, dass der Effekt der Totalreflexion besser in Verbindung mit der Abstrahlcharakteristik der Lichtquelle ausgenutzt wird und somit eine Auskoppelung an den Einkoppelstellen verhindert werden kann. Mit einer Kollimatoroptik besteht zudem die Möglichkeit, das zur Verfügung stehende Licht weiter in einen Lichtleiter hineinlenken zu können. Eine einseitige Einkoppelung in einem Lichtleiter kann die negative Eigenschaft besitzen, dass ein Helligkeitsverlauf insbesondere über gekrümmte Lichtleiter sichtbar ist.

Daher ist eine beidseitige Einkoppelung am Anfang und am Ende eines Lichtleiters im Hinblick auf die Homogenität stets vorzuziehen. Auf Grund der gerichteten Reflexion des Lichts durch die Prismen eines Lichtleiters ist das Erscheinungsbild dieses Systems stark von der Beobachtungsposition abhängig. Abbildung 2.26(a) und (b) zeigen in Abhängigkeit des horizontalen Beobachtungswinkels ($h=0^\circ$ und $h=30^\circ$) die Veränderung des Erscheinungsbilds eines Licht-

leitrings im Hinblick auf Helligkeit sowie Homogenität. Es zeigt sich hierbei deutlich, dass bei einer seitlichen Betrachtung Helligkeit und Homogenität deutlich abnehmen



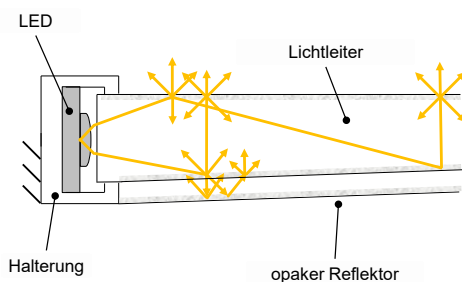
(a) Lichtleiter in senkrechter Beobachtungsrichtung ($H=0^\circ$, $V=0^\circ$)



(b) Lichtleiter in seitlicher Beobachtungsrichtung ($H=30^\circ$, $V=0^\circ$)

Abbildung 2.26: Ortsauflösende Leuchtdichtevertellung von Lichtleitern in senkrechter und seitlicher Beobachtungsrichtung

Eine Weiterentwicklung der Lichtleiter stellen bei BMW die sogenannten „glühenden Körper“ dar, welche u.a. im 5er BMW Baujahr 2010 eingesetzt werden. Diese Technologie besteht aus zwei Teilen. Das erste Teil ist ein Lichtleiter mit einer aufgerauten Oberfläche, an der das Licht diffus in alle Richtungen gestreut wird (vgl. Abbildung 2.27). Da sich bei diesem Prinzip keine Prismen innerhalb des Lichtleiters befinden, wird zusätzlich ein weiteres Bauteil mit einer opaken Reflektorstruktur verwendet, welches leicht angewinkelt hinter dem Lichtleiter positioniert ist. So kann das Erscheinungsbild im Hinblick auf die Homogenität nicht nur für senkrechte, sondern auch für seitliche Beobachtungsrichtungen stark verbessert werden.



(a) Schematische Darstellung der glühenden Körper



(b) Glühende Körper in der Schlusslichtfunktion eines BMW 5er

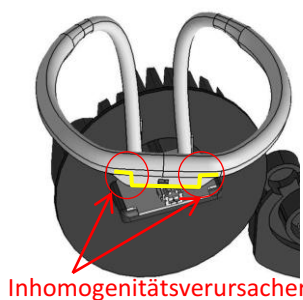
Abbildung 2.27: Glühende Körper in schematischer und fotografischer Darstellung

Fixierung der optischen Bauteile: Im Laufe eines Fahrzeuglebens sind alle Komponenten Vibrationen und Stößen ausgesetzt. Auf Grund von Materialermüdungen und einer unsachgemäßen Befestigung können sich die relativen Abstände und Positionen zwischen der Lichtquelle

und den Optiken leicht verändern. Lichttechnisch kann eine kleine geometrische Verschiebung einen großen Einfluss auf die Homogenität haben. Daher ist ein stabiles Befestigungskonzept innerhalb einer Beleuchtungskomponente für ein homogenes Erscheinungsbild während der gesamten Fahrzeuglebensdauer sehr wichtig.

Die Anforderungen an Befestigungselemente bestehen folglich darin, die Fixierung der lichttechnischen Elemente zueinander zu gewährleisten, ohne dabei das Erscheinungsbild negativ hinsichtlich der Homogenität zu beeinflussen. Daher nimmt die Konzeptionierung der Befestigungselemente durch die Positionierung, die geometrische Ausprägung und die Anzahl einen großen Einfluss auf das Erscheinungsbild.

Insbesondere bei Lichtleitsystemen spielen die Befestigungselemente eine entscheidende Rolle, da an diesen Stellen häufig ungewollt Licht ausgekoppelt wird. Die Befestigung des Lichtleiters erfolgt in diesem Falle beispielhaft mit Hilfe eines Befestigungselements, welches abgeschrägte Kanten besitzt (siehe rote Kennzeichnung in Abbildung 2.28(a)). Die abgeschrägten Kanten erweisen sich im Hinblick auf die Homogenität des gezeigten Lichtleiters als kontraproduktiv (siehe Abbildung 2.28(b)). Jedoch kann dies über eine geschickte Positionierung und die Geometrie der Befestigungselemente minimiert werden oder sogar komplett aus dem Blickfeld eines Beobachters entfernt werden. Eine Optimierungsmöglichkeit, ohne hierbei die Festigkeit des Systems zu verringern, besteht darin, statt den abgeschrägten, senkrechte Kanten zu verwenden (siehe gelbe Kennzeichnung in Abbildung 2.28(a)).



(a) CAD-Darstellung eines Lichtleiterkonzepts mit einem ungünstigen Befestigungskonzept



(b) Erscheinungsbild eines Lichtleitkonzepts mit einem ungünstigen Befestigungskonzept

Abbildung 2.28: Auswirkungen des Befestigungskonzepts auf die Homogenität eines Lichtleiters

2.3.1.3 Lichtquellen

Nachdem ein optisches System im Zuge der Entwicklung definiert worden ist, erfolgt eine konzeptionelle Abschätzung wie viel Lichtstrom aus wie vielen Lichtquellen und welcher technischen Ausprägung zur Realisierung des Designwunsches sowie der gesetzlichen Anforderungen eingesetzt werden muss. Die technische Ausprägung und Anzahl der verwendeten Lichtquellen

hängt neben den ästhetischen und gesetzlichen Anforderungen von dem Wirkungsgrad des optischen Systems, dem zur Verfügung stehenden Bauraum, dem Thermomanagement und insbesondere von den Kosten ab.

Derzeit werden in der automobilen Lichttechnik für die Realisierung der Signalfunktionen hauptsächlich Glühlampen und LEDs eingesetzt. Zukünftig werden auch andere Lichtquellen mit großen Energieeinspar- und Funktionspotenzialen wie Laser und OLED (Organische LED) in Betracht gezogen [11], [110].

Die derzeit für Signalleuchten eingesetzten Lichtquellen Glühlampe und LED besitzen beide verschiedene Vor- und Nachteile, die im Weiteren kurz erläutert werden. LEDs besitzen gegenüber Glühlampen den Vorteil, energieeffizienter zu sein, eine längere Lebensdauer zu besitzen und einen geringen Bauraum zu benötigen, wodurch sich für das Design eine Vielzahl von gestalterischen Möglichkeiten ergibt (vgl. Tabelle 2.2). Bei der Realisierung von weißen Lichtfunktionen wie dem Positions- und Tagfahrlicht ermöglicht das technische Prinzip einer LED weiße Farbvalenzen mit höheren Farbtemperaturen oder weiße Farbvalenzen außerhalb des plank'schen Kurvenzugs mit Farbnuancen zu realisieren. Dies ist ein weiterer Vorteil in der Verwendung von LEDs. Im Hinblick auf die Sicherheit erweist sich zudem der Einsatz von LEDs insbesondere bei den Signalfunktionen Bremslicht und Fahrtrichtungsanzeiger als vorteilhaft, da diese im Bereich von Mikrosekunden die volle Helligkeit erreichen [86].

Tabelle 2.2: Technologievergleich zwischen einer LED und einer Glühlampe [78], [81]

	LED	Glühlampe
Typbezeichnung	OSRAM Advanced Power TOPLED LR G6SP	OSRAM P21W Ultra-life 7506ULT
Lichterzeugungsprinzip	Lumineszenz	Temperaturstrahlung
Funktion	SL/BL	SL/BL
Dimension	3,5 mm x 3,6 mm x 2,1 mm	25,0 mm x 25,0 mm x 52,5 mm
Lebensdauer (B3)	50000 h	500 h
Farbe des Lichts	Rot	Weiß
Nennlichtstrom	12 - 24 lm	460 lm
Optische Effizienz	56 lm / W (typ.)	21,9 lm / W (typ.)
Nennleistung	0,277 - 0,34 W	21 W
Nennspannung	1,975 - 2,425 V	13,5 V
Nennstrom	140 mA	1556 mA

Der Einsatz von LEDs erweist sich im Hinblick auf die Kosten im Vergleich zu einer Glühlampe als nachteilig. Dieser Nachteil liegt in den vergleichsweise hohen Baukosten der LEDs, dem zusätzlich benötigten elektronischen Aufwand, wie Konstantstromtreiber, in aufwendiger Ausfallerkennung und im benötigten Thermomanagement. Da mit LED Lichtquellen im Gegensatz

zu Glühlampen optische Systeme mit geringeren Brennweiten realisiert werden können, ist das Erscheinungsbild empfindlicher gegenüber Positionierungsungenauigkeiten der Lichtquellen (siehe auch Abschnitt 2.3.2.2).

Nach der Philosophie vieler Hersteller im hochpreisigen Fahrzeugsegment überwiegen für den Einsatz von LEDs die Vorteile gegenüber den Nachteilen. Da im weiteren Verlauf speziell die Homogenität von Lichtleitsystemen in Verbindung mit LEDs untersucht wird, werden im nachfolgenden Teil zunächst der Aufbau und die Eigenschaften von LEDs dargestellt.

Eigenschaften von LEDs: Die LED ist eine Halbleiterdiode mit einem pn-Übergang, die bei Bestromung in Durchlassrichtung Photonen im sichtbaren Bereich abstrahlt. Der pn-Übergang beschreibt die Grenzschicht zwischen einem positiv und einem negativ dotierten Halbleiter. Das emittierende Licht hat seinen Ursprung in der Rekombination von Elektron-Loch-Paaren, wobei die Elektronen auf ein niederes Energieniveau zurückfallen und die freigewordene Energie in Form von Licht abgegeben wird [87].

Über die Wahl des Halbleitermaterials kann der Farbton des emittierten Lichts gesteuert werden. Dies hat den Vorteil, dass nicht zwangsläufig eine farbige Zwischenscheibe für die Realisierung einer farbigen Lichtfunktion wie das Schlusslicht benötigt wird [87].

Mit Hilfe zweier technischer Verfahren ist es auch möglich, mit LEDs weißes Licht zu erzeugen. Dies kann durch die Kombination des Lichts aus einer roten, einer grünen und einer blauen LED geschehen. Jedoch findet dies wegen der Ineffizienz in der exterieuren Fahrzeugbeleuchtung für die Realisierung von weißen Signalfunktionen keine Anwendung. Eine andere technische Lösung für die Erzeugung von weißem Licht ist die Verknüpfung einer blau emittierenden LED auf Basis von Galliumnitrid mit einer oder mehreren phosphoreszierenden Schichten, z.B. mit Lumineszenzfarbstoffen.

Bei dieser technischen Realisierung von weißen LEDs wird der Effekt der Photolumineszenz genutzt [72]. Hierbei regt ein Teil des emittierten, schmalbandigen, blauen Lichts der LED die phosphoreszierende Schicht zum Leuchten an, wodurch bei einer LED mit einer phosphoreszieren Schicht gelbes Licht emittiert wird [73],[87]. Durch die additive Mischung der Spektralfarben des gelben Lichts und des nicht umgewandelten Teils des blauen Lichts entsteht weißes Licht.

Je nach LED-Hersteller werden weiße LEDs dieser Art unter der Bezeichnung phosphor-converted-LED (pc-LED) oder Lumineszenzkonversions-LED (LUCO-LED) geführt. In Abbildung 2.29 ist der schematische Aufbau einer 2-pc-LED dargestellt. In diesem Beispiel ist ein sogenannter Flip-Chip mit einer Plastiklinse über einen Kupferkontakt mit einer metallischen Trägerschicht verlötet. Der Flip-Chip ist ein Substrat aus GaN- und InGaN-Schichten, die als Lichtaustrittsflächen verwendet werden. Die untere positiv dotierte Schicht besitzt zudem einen

hohen Reflexionsgrad. Die zur Farbmischung benötigten Phosphore sind in der oben im Chip positionierten Silikonschicht eingebettet [73].

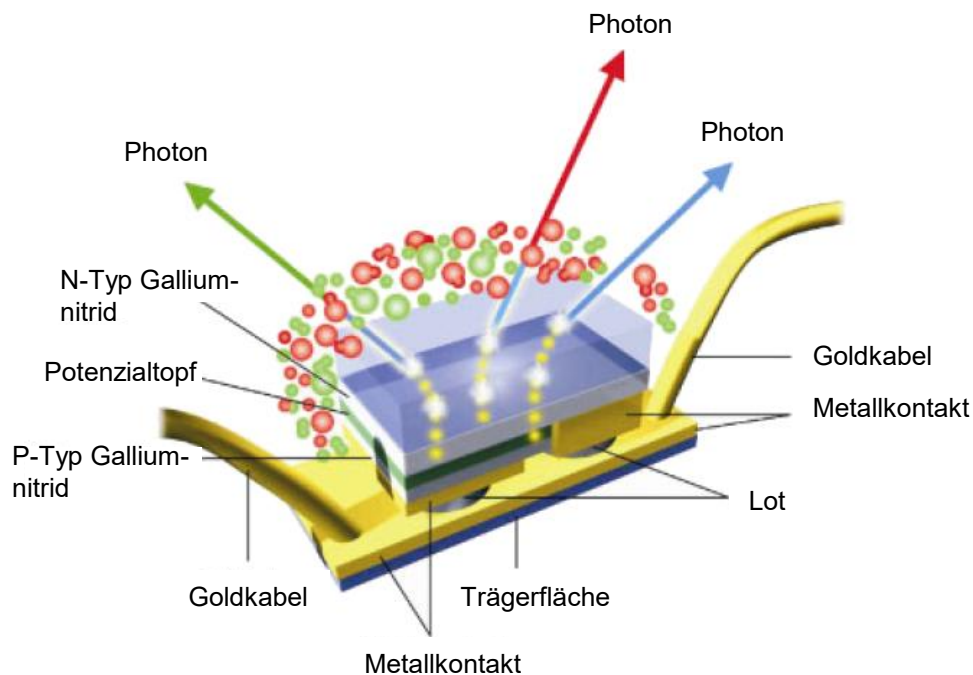


Abbildung 2.29: Schematischer Aufbau einer 2-pc-LED [73]

Die lichttechnischen Eigenschaften einer weißen LED ist über die Auswahl, die Geometrie sowie durch die Fertigungstoleranzen der phosphoreszierenden Schicht steuerbar. Andererseits beeinflusst die Auswahl und Dotierungsgenauigkeit der Halbleiter die Helligkeit und den Farbort der blauen LED. Bei der Betrachtung der spektralen Anteile einer LED äußert sich dies durch eine Veränderung des Orts und der Amplitude der Peak- und Schwerpunktwellenlänge (vgl. Abbildung 2.30). Die Veränderung der Schwerpunktwellenlänge in Abbildung 2.30 ist das Resultat der zuvor genannten Hintergründe. Der resultierende Farbort liegt in der CIE-Normfarbtafel auf der Verbindungsgeraden zwischen den beiden Farborten.

Im Gegensatz zu Glühlampen besitzen LEDs die Eigenschaft, dass in Abhängigkeit des Abstrahlwinkels eine Veränderung des Farborts und der Helligkeit besteht. Die Ausprägung der Eigenschaftsveränderung ist von LED zu LED verschieden (siehe Abbildung 2.31) und kann sich zudem auf den Sortierungsprozess der produzierten LEDs auswirken (vgl. Kapitel 2.3.1.3).

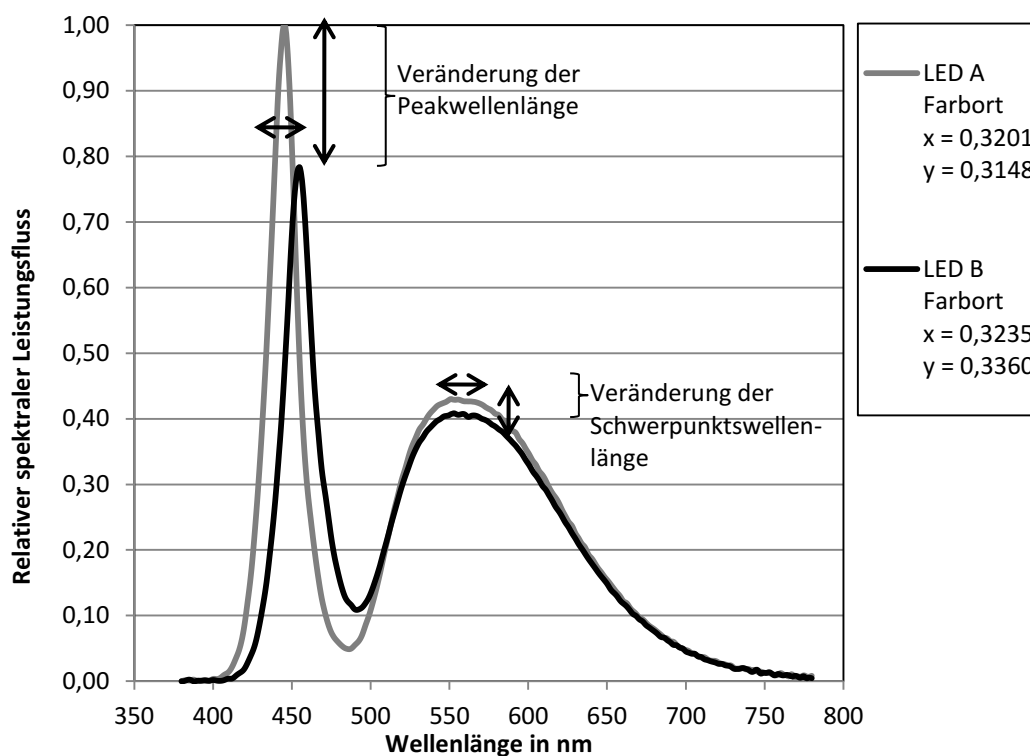


Abbildung 2.30: Vergleich der spektralen Anteile baugleicher Weiß-LED aus einer Binningklasse

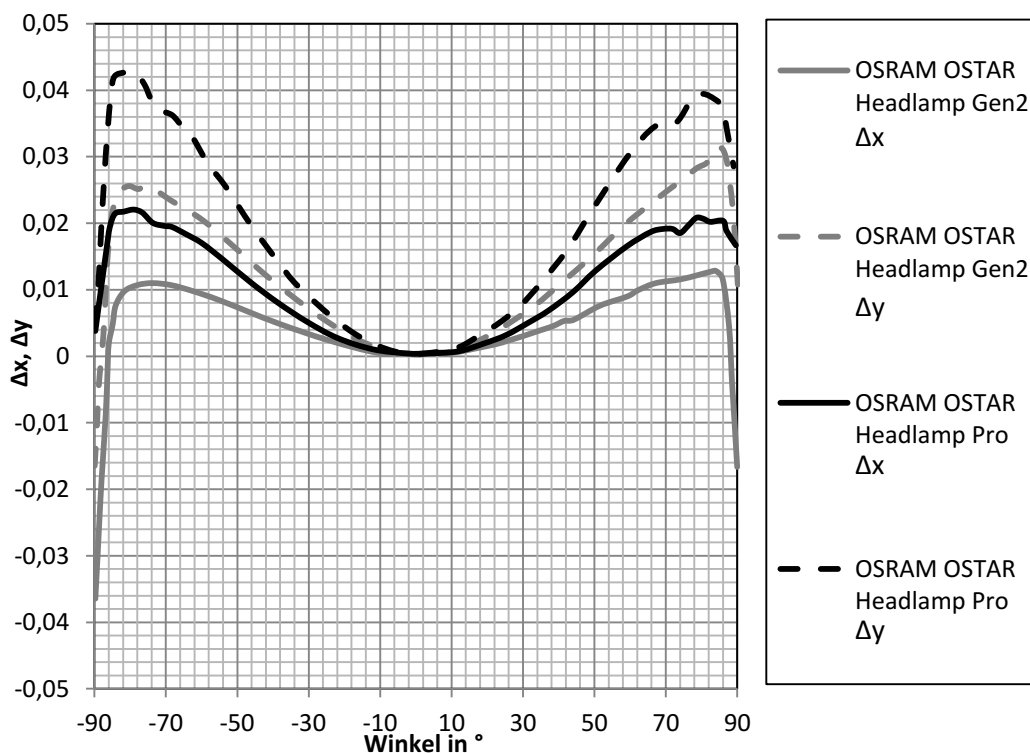


Abbildung 2.31: Farbwertanteiländerung Δx und Δy von LEDs in Abhängigkeit des Abstrahlwinkels [40]

Dieses Verhalten kann durch die Geometrie des Konverters begründet werden. Idealisiert veranschaulicht wird diese Eigenschaft in Abbildung 2.32. Auf der linken Seite von Abbildung 2.32 ist eine Skizze von einer weißen LED mit einem planaren und auf der rechten Seite eine Skizze mit einem kugelförmigen Konverter dargestellt. Zusätzlich sind ausgehend vom LED-Chip Lichtstrahlen durch den Konverter angedeutet. Aus Gründen der Übersichtlichkeit sind die Strahlen trotz des flächigen LED-Chips jedoch nur ausgehend von einem Punkt dargestellt.

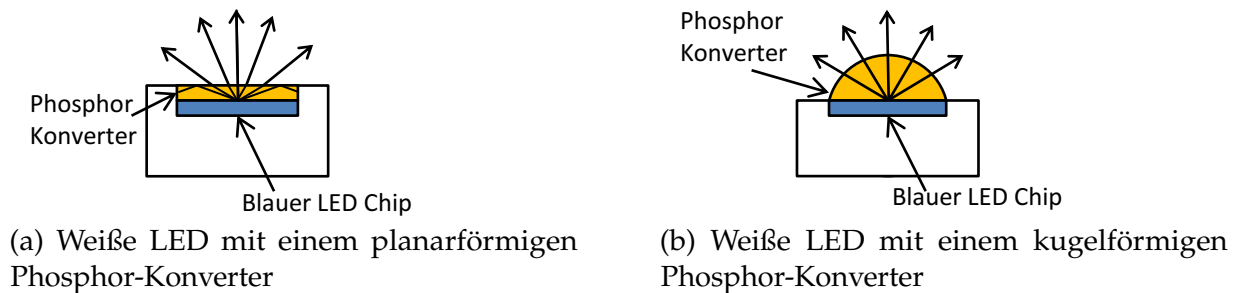


Abbildung 2.32: Schematische Darstellung einer weißen LED mit unterschiedlichen Konvertergeometrien

Es zeigt sich in Abbildung 2.32, dass die Strecke vom Ursprung des blauen LED-Chips durch eine planare phosphoreszierende Schicht in Abhängigkeit des Abstrahlwinkels variiert. Je größer der Winkel zur Normalen ist, desto länger ist die Strecke. Für die Farberzeugung bedeutet dies, dass für einen planaren Konverter bei großen Abstrahlwinkeln mehr Licht absorbiert und zugleich ein höherer Anteil konvertiert wird. Dies ist durch eine Verschiebung der Farbvalenz (Erhöhung der x,y Farbwertanteile) wahrnehmbar. Bei einer kugelförmigen Geometrie des Konverters ist dieser Effekt weniger stark ausgeprägt, da die Distanzen ausgehend von mittig erzeugten Lichtstrahlen gleich sind und nur bei außermittigen Lichterzeugungspositionen des LED-Chips variieren.

Binning von LEDs: Im Zuge des Produktionsprozesses streuen die Farborte und die Helligkeiten der LEDs. Daher klassifizieren die Hersteller LEDs in sogenannte Binnings, in denen diese nach Helligkeit und Farbigkeit sortiert werden.

Diese Farbsortierung umfasst einen Bereich der CIE xy-Farbtabelle, den der Hersteller im Bezug auf Form und Größe individuell auslegt. In den Datenblättern der Hersteller sind die Grenzen der Binningklassen mit Hilfe von mindestens vier Grenzfarborten in der xy-Farbtabelle angegeben. Das Binning erfolgt circa 35 ms nach dem ersten Einschalten. Nach etwas längerem Betrieb können wieder Unterschiede auftreten. Auf Grund der Größe der Binningklasse können bei Verwendung von mehreren weißen LEDs in einer Signalfunktion unerwünschte farbliche Inhomogenitäten auftreten (vgl. Kapitel 4).

Jeder LED-Hersteller muss im Zuge des Produktionsprozesses andere Vorschriften und interne Normen zur Sortierung der produzierten LEDs einhalten. Dies äußert sich durch die verschie-

denen Formen und Größen, welche für das Binning der LEDs sowohl herstellerintern als auch herstellerübergreifend gewählt werden (siehe Abbildung 2.33).

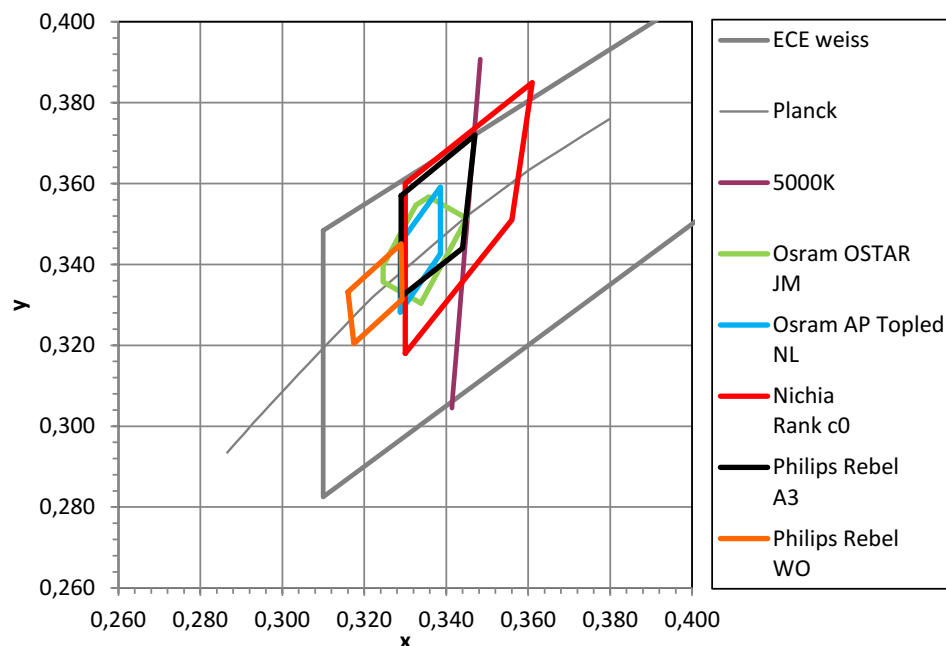
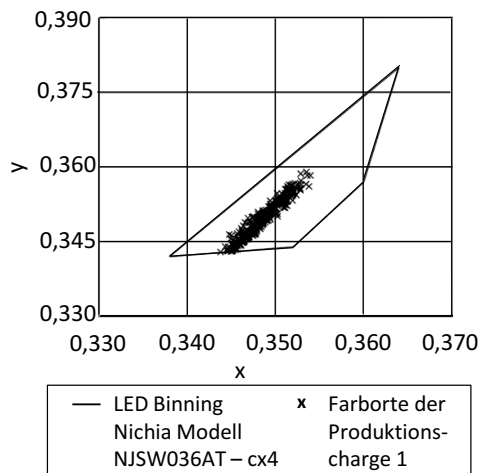


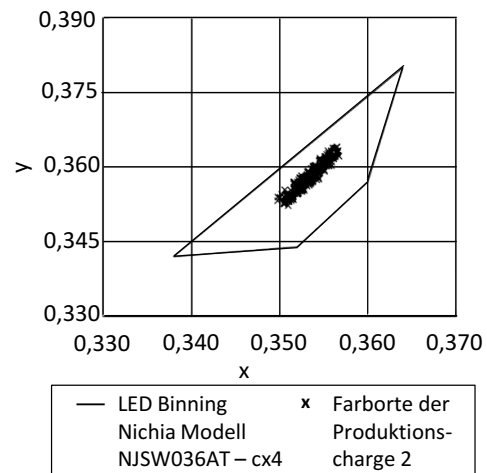
Abbildung 2.33: LED Farbbinning verschiedener Hersteller nach [85], [84], [80], [79], [23], [36]

Am Beispiel einer weißen LED wird in Abbildung 2.34 die Verteilung der herstellerseitig vermessenen Farborte innerhalb eines definierten Farbbinnings von zwei verschiedenen Produktionschargen gezeigt. In der Regel werden die LEDs zu 10.000 Einheiten in Rollen verpackt an die Fertigungsbänder der Leuchtenhersteller geliefert. In dem gezeigten Beispiel wurden von zwei Rollen jeweils circa 300 LEDs (in Abbildung 2.34 (a) und (b) als schwarze Kreuze dargestellt) vermessen. Grundsätzlich zeigt sich, dass in diesem Fall die Ausdehnung des definierten LED-Binnings nicht vollständig durch die produzierten LEDs benötigt wird. Die Varianz der Farborte erstreckt sich bei den beiden gezeigten Produktionschargen auf einer Gerade in positiver x- und y-Richtung bezogen auf die CIE xy-Normfarbtabelle. Im Gegensatz dazu ist die Ausdehnung in positiver x- und in negativer y-Richtung um ein Vielfaches geringer.

Obwohl die zuletzt genannte Ausdehnung geringer ist als die des Binning, halten die LED-Hersteller diese Ausdehnung vor. Dies liegt darin begründet, dass sich die Verteilung der Farborte sowohl durch die Streuung des blauen LED-Chips als auch durch die Streuung des Konvertierers verlagern kann. So ist es für die LED-Hersteller möglich, unterschiedliche Chargen mit verschiedenen photometrischen Eigenschaften als ein Produkt zu verkaufen und den eigenen Ausschuss zu verringern.



(a) Farborte der Produktionscharge 1



(b) Farborte der Produktionscharge 2

Abbildung 2.34: Verteilung der Farborte innerhalb eines definierten Farbbinnings von verschiedenen Produktionschargen einer weißen LED [24]

Unter Berücksichtigung aller Toleranzen vergrößert sich zusätzlich der reale Bereich eines Binnings. Die Messfehlertoleranzen verschiedener LEDs variieren nach Herstellerangaben für die Richtung des Farbwertanteils in einem Bereich von $\Delta xy = 0,005$ bis $0,012$ und für die Abweichung des Lichtstroms in einem Bereich von $\frac{\Delta \phi}{\phi} = \pm 6,5\%$ bis $\pm 10\%$ [84], [23].

Auch wenn nach Datenblatt unterschiedliche LED-Typen denselben Farb- und Helligkeitsbereich sowie dieselbe Fehlertoleranz besitzen, kann es subjektiv zu einer differenzierten Farbpmpfindung kommen. Dies kann durch die Farbortverteilung der produzierten LEDs sowie durch den Sortierungsprozess begründet sein, über den die Hersteller im Datenblatt keine Angaben machen. Der Sortierungsprozess ist durch das photometrische Messverfahren, die Fehlertoleranzen der optischen Messinstrumente sowie durch die Temperaturbedingung und die elektrische Ansteuerung der LEDs gekennzeichnet.

Zur Vermessung der Farbigkeit von LEDs verwenden die Hersteller entweder ein punktuell oder ein integrales, photometrisches Verfahren. Beim punktuellen Verfahren wird die LED nur senkrecht zur Lichtaustrittsfläche vermessen. Beim integralen Verfahren wird die vollständige Lichtverteilung der LED mit Hilfe einer Ulbrichtkugel vermessen. Beide Verfahren haben den Nachteil, dass die spektralen Anteile einer LED nicht exakt über den Raumwinkel erfasst werden. Jedoch ist das integrale Verfahren dem punktuellen vorzuziehen, da dieses wegen der Bestimmung eines Durchschnittsfarbortes eine höhere Genauigkeit bezüglich des gesamten Abstrahlwinkels einer LED besitzt. Anders als bei direktabstrahlenden optischen Systemen wird bei Lichtleitsystemen das farbige Erscheinungsbild bei einer senkrechten Betrachtung nicht nur durch den senkrechten, sondern durch den vollständigen Abstrahlwinkel der Lichtaustrittsfläche der LEDs beeinflusst. Das bedeutet für den Einsatz von unterschiedlichen LED-Typen mit

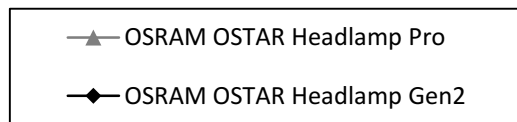
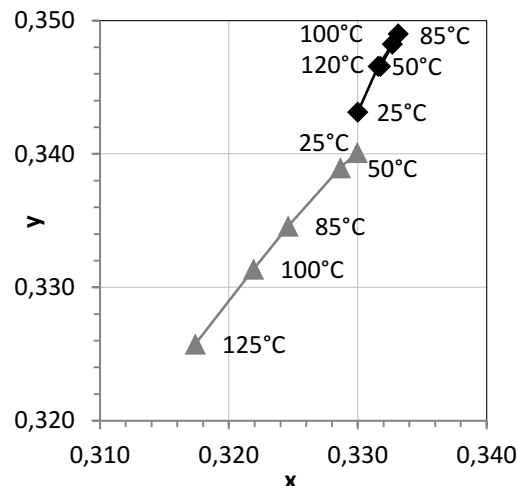
verschiedenen Messverfahren in mehrere Lichtleiter, dass das farbige Erscheinungsbild trotz gleich ausgewiesenem Farbbinning unterschiedlich sein kann.

Verfügbarkeit von LEDs: Die Auswahl einer LED-Lichtquelle für ein Leuchtenkonzept wird neben den qualitativen und photometrischen Eigenschaften durch die Verfügbarkeit und die Kosten der am Markt erhältlichen Bauteile bestimmt. Bei einem großen Auftragsvolumen kann es der Fall sein, dass ein LED-Typ mit einem bestimmten Farbbinning in der benötigten Menge auf Grund von nicht vorhandenen Produktionskapazitäten der LED-Hersteller nicht zeitgerecht zur Verfügung steht. Verschärft wird diese Problematik durch den Hintergrund, dass die Automobilhersteller von den Lichtquellenherstellern LEDs mit denselben technischen Eigenschaften (Farbbinning und Helligkeit) anfordern und zudem in Konkurrenz zu großen LED-Abnehmern aus der Unterhaltungsindustrie stehen. Resultat des Konkurrenzwetbewerbs ist, dass LED-Hersteller kleinere Binningklassen, bei denen ein Farbunterschied nicht wahrnehmbar ist, wegen des produzierten Ausschlusses, des aufwendigeren Sortierungsverfahrens und der allgemeinen sehr großen Nachfrage teurer verkaufen. Aus Kostengründen kann es daher sein, dass ein Leuchtenhersteller eine teurere, aber verfügbare LED aus wirtschaftlichen Gründen nicht anbieten möchte. Deshalb kann es bei der Entwicklung einer Lichtfunktion entgegen funktionaler Anforderungen dazu kommen, dass mehrere LED-Binnings oder ein größeres Binning verwendet werden müssen. In beiden Fällen wird so das Erscheinungsbild hinsichtlich einer farblichen Homogenität beeinflusst.

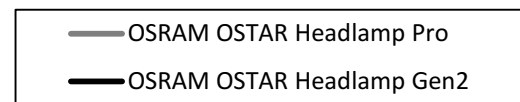
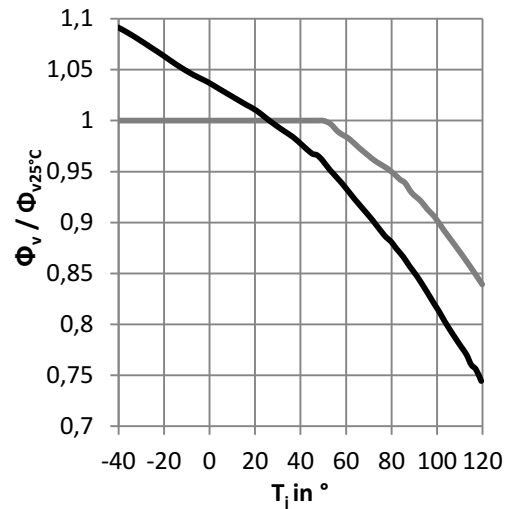
Ein weiterer Aspekt ist die Verfügbarkeit eines LED-Binnings über die gesamte Fahrzeuglebensdauer oder während der Entwicklungs- und Produktionsphase. Daher kann es bei einem einseitigen Wechsel einer Fahrzeuglichtkomponente dazu kommen, dass z.B. Helligkeits- und Farbunterschiede bei der frontalen Betrachtung zwischen den Frontleuchten des Fahrzeugs wahrnehmbar sind. Deshalb sollten auch bei einem Wechsel von weißen Lichtfunktionen bei der Verwendung von LEDs und Gasentladungslampen stets beide Lichtquellen der linken und rechten Frontleuchte getauscht werden.

Betriebspunkt: Der Betriebspunkt ist durch die thermischen und elektrischen Eigenschaften gekennzeichnet. Im Automobilbereich erfolgt die elektrische Ansteuerung einer LED-Lichtquelle durch eine Konstantstromquelle und durch eine Pulsweitenmodulation. Bei der pulsweitenmodulierten Ansteuerung wird die Lichtquelle getaktet betrieben. Dies kann bei einer geringen Trägerfrequenz den Nachteil haben, dass ein Flimmern (Perlschnureffekt) für den Menschen wahrnehmbar ist [100],[105],[53]. Ein Vorteil der pulsweitenmodulierten Ansteuerung liegt jedoch darin, dass eine Dimmung der Helligkeit über das Tastverhältnis erfolgen kann. Bei LED-Lichtquellen besitzt diese Ansteuerung zudem den positiven Effekt, dass bei einer weißen LED der Farbort über dem gesamten ansteuerbaren Helligkeitsbereich konstant ist.

Das Helligkeitsniveau einer Lichtfunktion kann die Bewertung der Homogenität beeinflussen. Unter der Voraussetzung, dass der optische Wirkungsgrad eines Systems gleichbleibt, ist die Helligkeit der Lichtfunktion umso höher, je leistungsstärker eine Lichtquelle ist. Die Helligkeit beeinflusst die Adaptation und die Blendempfindung eines Probanden stark, so dass Leuchtdichtekontraste gegebenenfalls nicht mehr wahrnehmbar sind (vgl. Abschnitt 2.4.4).



(a) Farbortänderung von LEDs in Abhängigkeit der Temperatur [40]



(b) Helligkeitsänderung von LEDs in Abhängigkeit der Temperatur [40]

Abbildung 2.35: Änderung der photometrischen Eigenschaften einer LED am Beispiel der Osram Ostar [40]

Die elektrische Ansteuerung beeinflusst nicht nur lichttechnische Eigenschaften, sondern auch das thermische Verhalten der Lichtquelle. Eine LED-Lichtquelle besitzt die Charakteristik, dass sich die Helligkeit bei Erhitzung des Bauteils bzw. bei einer Erhöhung der Junctiontemperatur T_j stark verringert und der Farbort nicht konstant bleibt (vgl. Abbildung 2.35).

2.3.2 Leuchtenproduktion

2.3.2.1 Werkzeugtoleranzen

Jede Fertigung ist Qualitätsschwankungen unterworfen. Dies wurde zuvor bereits am Beispiel des LED-Binnings angedeutet. Aber auch alle Kunststoffbauteile einer Leuchte sind davon betroffen. Qualitätsschwankungen sind besonders bei optisch sichtbaren Bauteilen kritisch, da diese maßgeblich das Warmerscheinungsbild einer Leuchte beeinflussen. Zur Herstellung von massengefertigten Kunststoffteilen werden Spritzgusswerkzeuge eingesetzt, bei denen unter

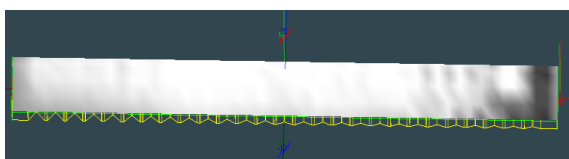
hohem Druck flüssiger Kunststoff in eine Form gespritzt wird [59]. Nach Aushärtung des Kunststoffs wird das Werkstück mit Hilfe eines Schiebers vom Werkzeug getrennt.

Durch eine ungleichmäßige Einspritzung des flüssigen Kunststoffs ist es im Zuge des Herstellungsprozesses möglich, dass innerhalb des optischen Bauteils Lufteinschlüsse vorhanden sind. Diese verursachen im Erscheinungsbild eine helle Auskoppelstelle.

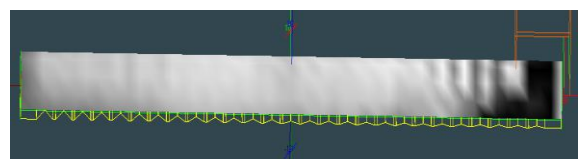
Zudem können sowohl durch eine unsaubere Werkzeuggtrennung, als auch durch einen unsachgemäßen Transport Kratzer auf sensiblen Bauteilen, wie einem Lichtleiter, entstehen. Optische Bauteile, wie Abschlusscheiben oder Lichtleiter, besitzen einen kleinen nicht vermeidbaren sichtbaren Einspritzpunkt. Bei Entwicklung der Komponenten ist im Hinblick auf die Homogenität darauf zu achten, dass sich dieser Punkt nicht mittig und eindeutig sichtbar befindet.

2.3.2.2 Positionierungstoleranzen

Wie bereits in Kapitel 2.3.1.2 erläutert wurde, ist die exakte Positionierung auf Grund der Abstrahlcharakteristik einer Lichtquelle eine Grundvoraussetzung für ein homogenes Erscheinungsbild. Zudem sind bei der Aneinanderreihung von punktförmigen Lichtquellen wegen der kleinen Emittierungsflächen von LEDs auch kleine Positionierungsungenauigkeiten im Millimeterbereich sichtbar. Für einen Beobachter scheinen die punktförmigen Lichtquellen nicht mehr in einer Flucht zu sein oder es entstehen an Lichtleitern z.B. sichtbare Einkoppelstellung oder dunkle Flecken, da die technische Abstimmung zwischen der Lichtquelle und der Optik nicht mehr vorhanden ist (vgl. Abbildungen 2.36(a) und (b)).



(a) Optimal positionierte LED



(b) Um 1 mm defokussierte LED

Abbildung 2.36: Simulation der Auswirkungen der Positionierungstoleranzen am Beispiel eines Lichtleiters und einer LED

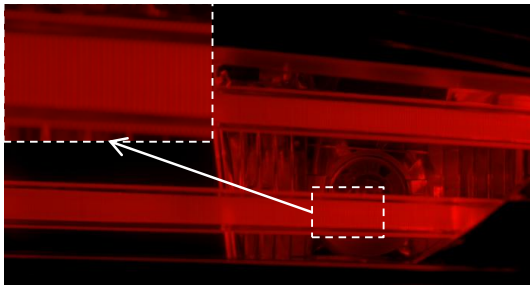
Im Zuge der Entwicklung müssen daher die geometrischen Schwankungen der optischen Elemente sowie die Positionierungsgenauigkeit bei der maschinellen Bestückung mit Robotern (Toleranzkette Platine - Lichtquelle) und in die Endmontage (Toleranzkette Platine mit Lichtquelle - Optik) berücksichtigt werden.

2.3.3 Leuchtenalterung

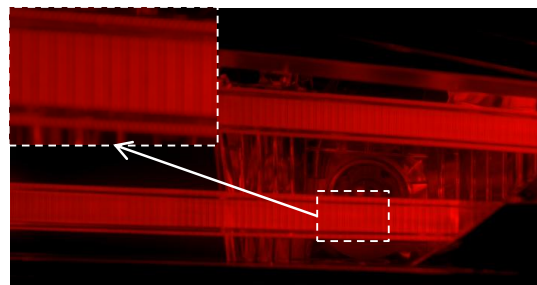
2.3.3.1 Werkzeugabnutzung

Sowohl die Produktionswerkzeuge als auch die im Fahrzeug verbauten Lichtkomponenten sind verschiedenen Alterungsprozessen ausgesetzt, die sich negativ auf das homogene Erscheinungsbild auswirken können.

Im Zusammenhang mit dem Spritzgusswerkzeug ist anzumerken, dass diese immer nur eine begrenzte „Lebensdauer“ besitzen. Im fortschreitenden Produktionszyklus einer solchen Maschine können der Wirkungsgrad und die Homogenität einer Lichtkomponente auf Grund von Abnutzungserscheinungen abnehmen, die sich durch Abrundung an Werkstückkanten deutlich machen. Sobald die Kanten an rückseitig prismierten Lichtleitern größere Radien erhalten, wird an diesen Stellen Licht in nicht vorgesehenen Richtungen gestreut.



(a) Erscheinungsbild von Lichtleitern einer Heckleuchte zu Produktionsbeginn



(b) Erscheinungsbild von Lichtleitern einer Heckleuchte nach 250.000 Einheiten

Abbildung 2.37: Erscheinungsbild von Lichtleitern in Abhängigkeit der produzierten Einheiten

Zur Verdeutlichung sind in den Abbildungen 2.37(a) und (b) mehrere Lichtleiter des identischen Heckleuchtentyps gegenübergestellt. Die ursprüngliche Geometrie des Werkzeugs ist in beiden Fällen identisch. Anhand Abbildung 2.37(b) ist jedoch die Veränderung des Erscheinungsbilds nach ungefähr 250.000 Einheiten zu erkennen. Deutlich zu sehen ist, dass nicht jedes Prisma das Licht wie gewünscht auskoppelt.

2.3.3.2 Umwelteinflüsse

Durch Umwelteinflüsse, insbesondere in Ländern mit einer hohen Luftverschmutzung, können sich innerhalb einer Leuchte große Mengen von Feinstaub ansammeln. Sobald sich der Feinstaub mit einer Feuchtigkeit verbindet, kann sich dieser gebündelt an optisch wirksamen Flächen anlagern (vgl. Abbildung 2.38(b)), wo das Licht unbeabsichtigt gestreut bzw. bei Lichtleitern ausgekoppelt wird.



(a) Vergilbung eines Tagfahrlichtrings durch Sonneneinstrahlung



(b) Verunreinigungen innerhalb eines Scheinwerfers durch einen starken Feinstaubeintrag

Abbildung 2.38: Fotografische Darstellung von Umwelteinflüssen

Weitere Alterungserscheinungen sind die sogenannte Vergilbung und das Mattwerden von transparenten Kunststoffen, welche unter anderem bei Lichtleitern eingesetzt werden [31]. Bei der Vergilbung verfärbt sich ein Kunststoff durch UV-Strahlung und Oxidation gelblich (vgl. Abbildung 2.38(a)). Beim Mattwerden nimmt die Transparenz des Kunststoffes an intensiv bestrahlten Regionen ab. Der Zeitraum, in dem die beiden beschriebenen Erscheinungen auftreten können, ist abhängig von den eingesetzten Werkstoffen und kann durch optische Aufheller (z.B. bei Polycarbonat Bis-benzoxazole und Phenylcumarine) verzögert werden [31].

2.4 Visuelle Wahrnehmung von Inhomogenitäten

Goldstein beschreibt die visuelle physiologische Wahrnehmung als einen geschlossenen, kontinuierlichen Prozess aus visuellen Stimuli (blaue Pfeile) in Form von elektromagnetischen Wellen, Verarbeitungsvorgängen (türkise Pfeile) und perzeptuellen Antworten (orangene Pfeile) [43]. Dieser Prozess findet sich im CIE-Report zu den visuellen Aufgaben beim Führen eines Kraftfahrzeugs wieder [19].

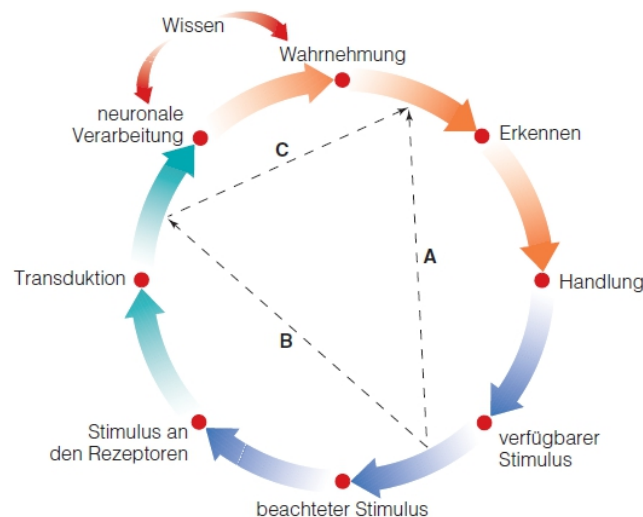


Abbildung 2.39: Menschlicher Wahrnehmungsprozess nach Goldstein [43]

Über den Sehapparat des Menschen gelangt das Abbild eines betrachteten Stimulus auf die Netzhaut, wo eine Umwandlung des Lichts in elektrische Energie über die lichtempfindlichen Rezeptoren stattfindet. Anschließend werden die elektrischen Energien neuronal im Gehirn verarbeitet. Damit ein Stimulus zunächst einmal wahrgenommen werden kann, muss die resultierende Energie oberhalb einer Detektionsschwelle liegen [43].

Der minimale Leuchtdichtekontrast zwischen einem Objekt und seinem Umfeld definiert photometrisch die Detektionsschwelle. Wahrnehmung ist als eine bewusste sensorische Erfahrung zu verstehen, bei der ein Beobachter ein Objekt, z.B. eine Inhomogenität in einem Signalbild, detektieren kann, ohne es klassifizieren zu können [43]. Im nachfolgenden Erkennungsprozess (Diskrimination) wird ein Objekt interindividuell durch kognitive Vergleiche einer bestimmten Kategorie zugeordnet. Dies bedingt, dass die Bewertung von Lichtszenarien subjektiv ist.

Zusammenfassend kann die Erkennbarkeit von Inhomogenitäten bei Signalleuchten auf objektive und subjektive Einflussfaktoren zurückgeführt werden. In Abbildung 2.40 sind diese Einflussgrößen gegliedert in Sehelement, Beobachter sowie Beobachtungsszenario dargestellt.

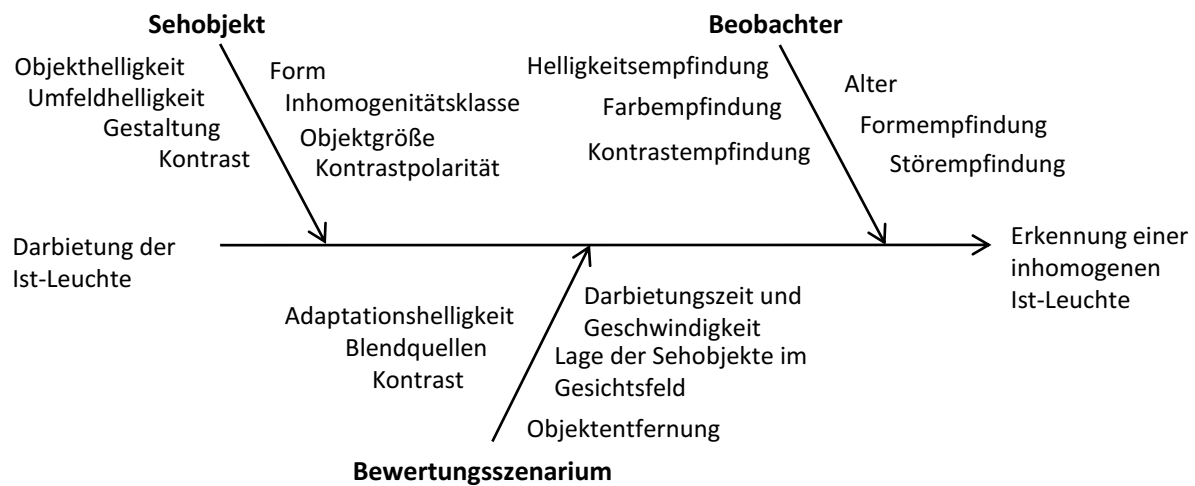


Abbildung 2.40: Einflussfaktoren für die Erkennung von Inhomogenitäten

In den folgenden Abschnitten werden die bedeutenden Einflussfaktoren für die Wahrnehmung und die Erkennung von Lichtszenarien im Straßenverkehr, aber auch bei der einfachen Betrachtung von Fahrzeugen im statischen Fall, z.B. in einem Ausstellungsraum, beschrieben.

2.4.1 Helligkeitsempfindung

Der subjektive Helligkeitseindruck stellt die Basis für die visuelle Wahrnehmung dar. Dieser ist ein Maß für die Menge des wahrgenommen sichtbaren Lichts. Nach der CIE sind für den Menschen sichtbare Strahlungen, also Licht, in einem Wellenlängenbereich von 360 nm bis 830 nm wahrnehmbar [26].

Aus psychophysikalischen Experimenten von Weber zur Helligkeitsempfindung hat Fechner abgeleitet, dass sich die subjektive Helligkeitsempfindung nicht linear sondern logarithmisch zum objektiven Helligkeitsreiz verhält. Dazu musste Fechner Annahmen treffen, die ausschließlich um den Adaptationsbereich näherungsweise gültig sind. Die Erkenntnis aus den Experimenten von Weber ist, dass identische Leuchtdichten eines Objekts in unterschiedlichen Umgebungshelligkeiten unterschiedlich bewertet werden (vgl. Kapitel 2.4.4) [115], [37].

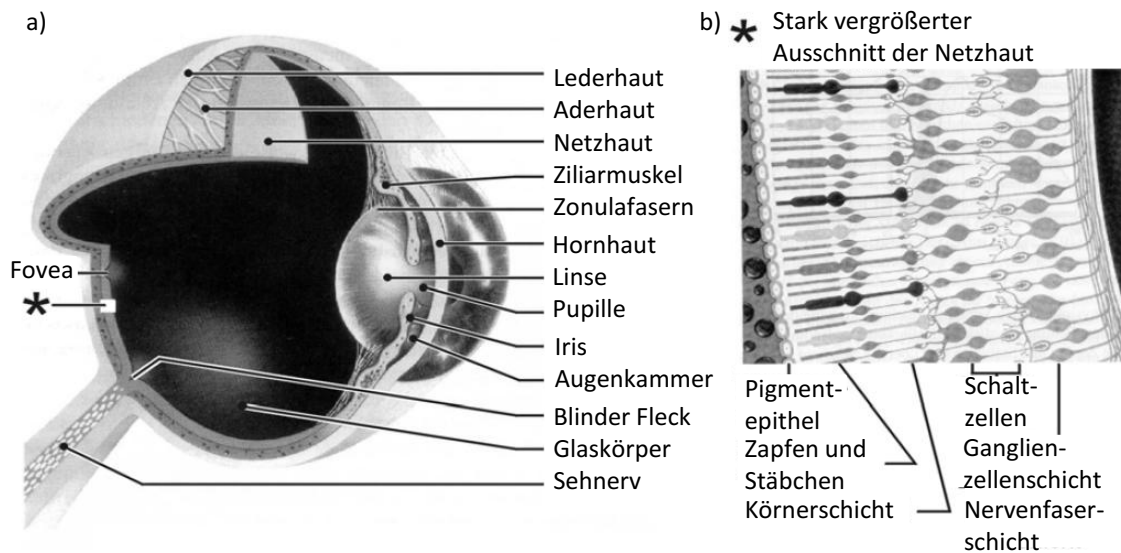


Abbildung 2.41: Schematische Darstellung des Auges (a) und Schnitt durch die Netzhaut (b) nach [48]

Innerhalb der Netzhaut gibt es zwei verschiedene Zelltypen, die Stäbchen und die Zapfen, die an der Helligkeitswahrnehmung beteiligt sind (siehe Abbildung 2.41). Die Anzahl der Zelltypen ist vom Bereich der Netzhaut abhängig (siehe Abbildung 2.42).

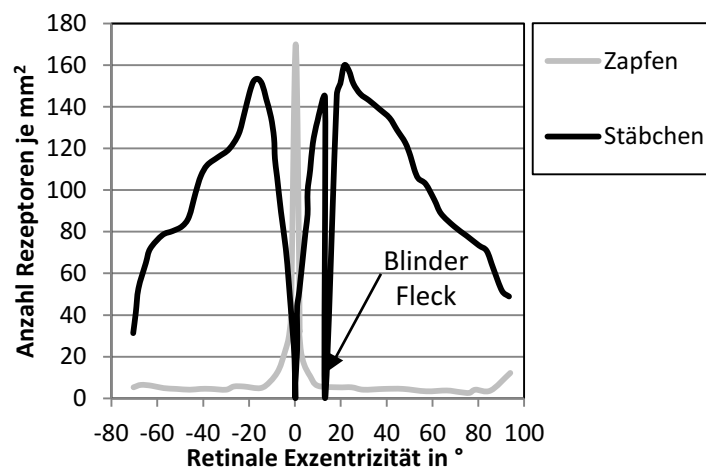


Abbildung 2.42: Verteilung von Zapfen und Stäbchen auf der Netzhaut in Abhängigkeit des Winkels [82]

In beiden Zelltypen befinden sich Sehpigmente. Bei einem Lichteinfall wird eine photochemische Reaktion ausgelöst, bei der die Sehstoffe zerfallen und dadurch ein elektrischer Potenzialunterschied in den Rezeptoren erzeugt wird. Dieser Potenzialunterschied wird in neurologischen Prozessen verarbeitet [48].

Die Zapfen sind im photopischen Bereich aktiv, d.h. beim Sehen am Tag bzw. bei ausreichender Leuchtdichte. Zapfen ermöglichen neben der Helligkeits- auch eine Farbwahrnehmung, da sich drei Zapfentypen mit unterschiedlichen spektralen Sensitivitäten im Auge befinden. Die Stäbchen sind im skotopischen Bereich für ein Sehen in der Nacht ohne eine Farbwahrnehmung verantwortlich (siehe Tabelle 2.3). Im mesopischen Bereich, dem Sehen in der Dämmerung, sind sowohl die Stäbchen als auch die Zapfen mit ihren unterschiedlichen spektralen Eigenschaften beteiligt [26].

Die CIE definierte für Kleinfeld- (2°) und Großfeld-Normalbeobachter (10°) die in Abbildung 2.43 gezeigten relativen spektralen Empfindlichkeitskurven für das Tag- ($V_2(\lambda)$) und Nachtsehen ($V'_{10}(\lambda)$) in Abhängigkeit von der Wellenlänge λ [26]. Hierbei liegt die maximale spektrale Empfindlichkeit beim Tagsehen bei einer Wellenlänge von 555 nm und beim Nachtsehen bei einer Wellenlänge von 507 nm. Die Verschiebung der maximalen spektralen Empfindlichkeit in den blauen Spektralbereich wird in der Literatur Purkinje-Effekt genannt [26].

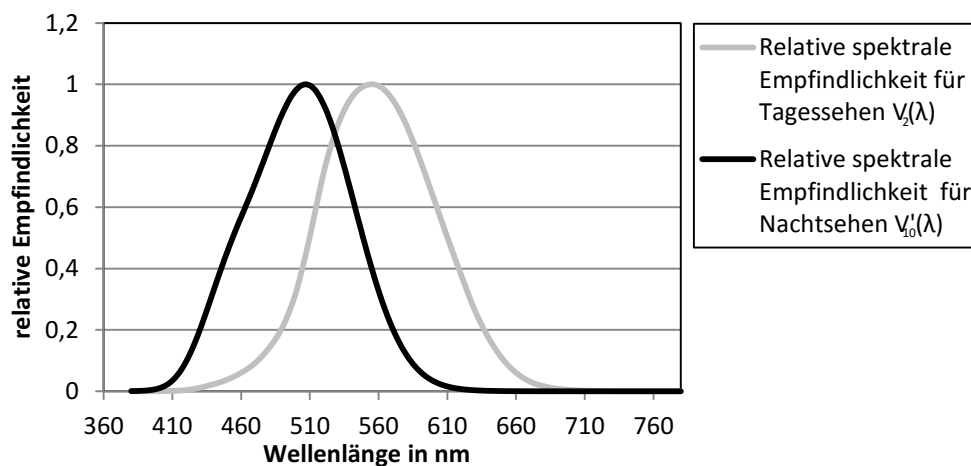


Abbildung 2.43: Relative spektrale Empfindlichkeitskurven für das Tag- und Nachtsehen [26]

Die Pupillenweite des Auges d_p ($2 r_p$) regelt die Beleuchtungsstärke des Lichts, welches auf die Netzhaut auftrifft [26]. Durch die gesamten Leuchtdichten aus dem Gesichtsfeld entsteht an der Pupille eine Pupillenlichtstärke I_p . Der Ort des Strahldurchtritts beeinflusst die Größe der Lichtstärke. Dieser Richtungseffekt ist in der Literatur als „Stiles-Crawford-Effekt erster Art“ bekannt [104]. Vor diesem Hintergrund approximierten Moon und Spencer [69] eine Näherungsformel 2.3, mit der die reduzierte Pupillen-Lichtstärke I'_p vereinfacht aus dem Durchmesser der Pupille d_p bestimmt werden kann (siehe Gleichung 2.3).

$$I'_p = 1,0136 \cdot (1 - 0,0106 \cdot d_p^2 + 4,17 \cdot 10^{-5} \cdot d_p^4) \cdot I_p \quad (2.3)$$

Nach DIN 5031 [26] kann die Beleuchtungsstärke der Netzhaut E_B als entscheidende physikalische Größe zur Beschreibung des Helligkeitseindrucks herangezogen werden. Die Beleuchtungs-

stärke der Netzhaut wird abhängig von den Leuchtdichten des gesamten Sichtfeldes L und der Pupillenfläche des Auges A_p bestimmt. Ein normales Gesichtsfeld besitzt eine Dimension von bis etwa 90° temporal, 60° nasal, 55° nach oben und 60° nach unten (siehe Abbildung 2.44).

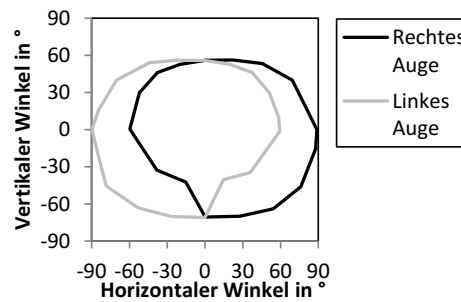


Abbildung 2.44: Binokulares Gesichtsfeld nach Eckert [33]

Nach Troland [107] lautet eine deterministische Beschreibung der Netzhautbeleuchtungsstärke E_B für das Tagsehen unter der Annahme einer kreisförmigen Pupille wie folgt:

$$E_B = \frac{I_p}{r_p^2} \cdot \Omega_0 = \frac{L \cdot A_p}{r^2} \cdot \Omega_0 \quad (2.4)$$

In der Praxis sind die zuvor aufgezeigten Formeln jedoch nur schwer anwendbar, da die Beleuchtungsstärke der Netzhaut durch die Veränderung der Pupillenweite fortlaufend zum eigenen Schutz der Netzhaut oder zur besseren Erkennbarkeit von Objekten geregelt wird.

Daher hat sich zur Darstellung des Helligkeitseindrucks allein die Leuchtdichte unter der Voraussetzung einer konstanten Pupillengröße für die photometrische Beschreibung der Helligkeitsempfindung etabliert. Schierz zeigt jedoch verschiedene Themen auf, weshalb die Leuchtdichte nicht allein für die subjektive Helligkeitsempfindung herangezogen werden kann. Die $V(\lambda)$ -Kurven basieren auf einem 2° oder 10° Beobachter. Durch eine Vergrößerung des Objektwinkels erhöht sich der wahrgenommene Blauanteil, da sich die relative Zusammensetzung der Stäbchen und Zapfen (siehe Abbildung 2.42) mit zunehmenden Winkel verändert. Die $V_{10}(\lambda)$ -Funktion weist gegenüber der $V_2(\lambda)$ -Funktion im blauen Bereich eine erhöhte relative Empfindlichkeit auf [94]. Ein weiterer Effekt, der Helligkeitsempfindung beeinflusst, ist auf die Farbwahrnehmung zurückzuführen. Hier ist der Helmholtz-Kohlrausch-Effekt zu nennen, der besagt, dass die Helligkeitsempfindung vom dem Sättigungsgrad einer Farben abhängig ist[93].

Zudem berücksichtigen die Empfindlichkeitskurven keine individuellen Unterschiede zwischen Personen unterschiedlichen Alters und auch nicht die Tagesform eines Individuums.

2.4.2 Adaptationsleuchtdichte

Die Anpassung des menschlichen Auges an die Umgebungsleuchtdichte wird Adaptation genannt. Die Adaptationsleuchtdichte ist die photometrische Größe zur Beschreibung des Adaptationszustands (siehe Tabelle 2.3) und dient als Eingangsgröße für die Kontrastempfindung.

Tabelle 2.3: Adaptationszustand in Abhängigkeit der Adaptationsleuchtdichte [26]

Adaptationszustand	Adaptationsleuchtdichte
Photopisch	$> 10 \text{ cd/m}^2$
Mesopisch	$0,01 \text{ cd/m}^2 < L < 10 \text{ cd/m}^2$
Skotopisch	$< 0,01 \text{ cd/m}^2$

Für die Bestimmung der Adaptationsleuchtdichte L_a gibt es in der Literatur verschiedene Ansätze. Hierbei ist bei der Bestimmung zwischen einer örtlich homogenen und zeitlich stationären Leuchtdichte sowie zwischen inhomogenen und dynamischen Leuchtdichten im Gesichtsfeld zu unterscheiden. Ein allgemein gültiges und einheitliches Verfahren wurde hierfür, insbesondere für die Bestimmung in einem alltäglichen inhomogenen Gesichtsfeld, bisher nicht festgelegt [21].

Nach Thiele und Gall kann die Adaptationsleuchtdichte eines homogenen und auch eines inhomogenen Gesichtsfelds durch die mittlere Leuchtdichte L_m einer Stirnfläche eines Kegels A_{Kegel} bestimmt werden (siehe Abbildung 2.45) [106]. Nach Gleichung 2.5 ist die mittlere Leuchtdichte durch die Leuchtdichten der strahlenden Teilflächen und den dazugehörigen Teilraumwinkeln bestimmt.

$$L_a = L_m = \frac{\sum_{i=1}^n L_i \cdot A_i}{\sum_{i=1}^n A_i} \quad (2.5)$$

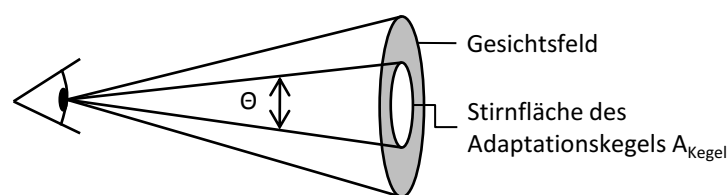


Abbildung 2.45: Skizze des Adaptationskegel für die Bestimmung der Adaptationsleuchtdichte

Die Größe dieser Stirnfläche A_{Kegel} ist von dem Öffnungswinkel Θ abhängig. Für die Bestimmung des Öffnungswinkels sind in der Literatur verschiedene Angaben zu finden. In Tabelle 2.4 sind verschiedene Winkel aufgelistet, welche in der Literatur vorgeschlagen werden.

Es wird die Annahme getroffen, dass in einer dunkleren Umgebung die Helligkeitsempfindung im Gesichtsfeld durch die Dimension der Signalleuchte geprägt wird. Daher wird in dieser

Tabelle 2.4: Öffnungswinkel zur Bestimmung der Adaptationsleuchtdichte

	Engel[34]	Dreyer[32]	Schmidtke[99]	Kaiser Boynton[51]	Ward Larson[112]
Θ	40°	30°	30°	6°	1°

Arbeit sowohl die aus Tabelle 2.4 vorgeschlagene Größe von 6° als auch ein variabler Adaptationswinkel verwendet. Der variable Adaptationswinkel ergibt sich hier aus der maximalen diagonalen Ausdehnung der Signalleuchte (siehe Abbildung 2.46). So werden die unterschiedlichen Dimensionen der Signalleuchten berücksichtigt. Nach Kaiser und Boynton nimmt die Hintergrundleuchtdichte eine untergeordnete Rolle ein, solange der Adaptationskegel größer als 6° ist [51]. Beide Winkel werden im Rahmen der Modellvalidierung zum Thema Bewertung der Homogenität von Signalleuchten gegenübergestellt und bewertet.

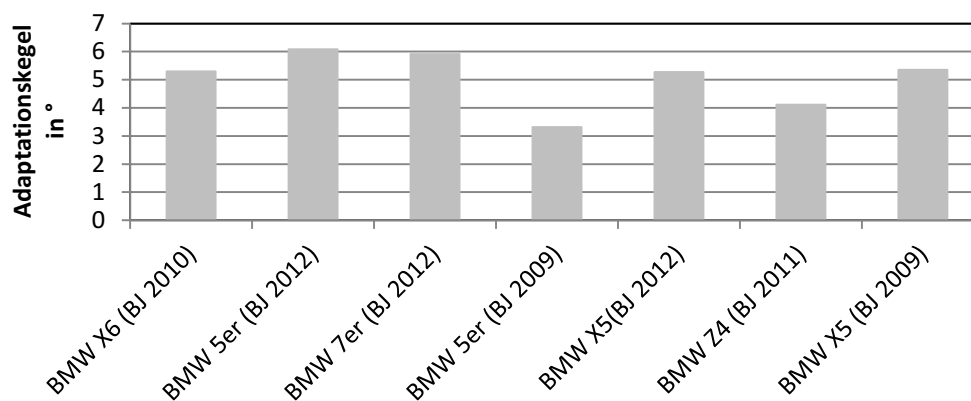
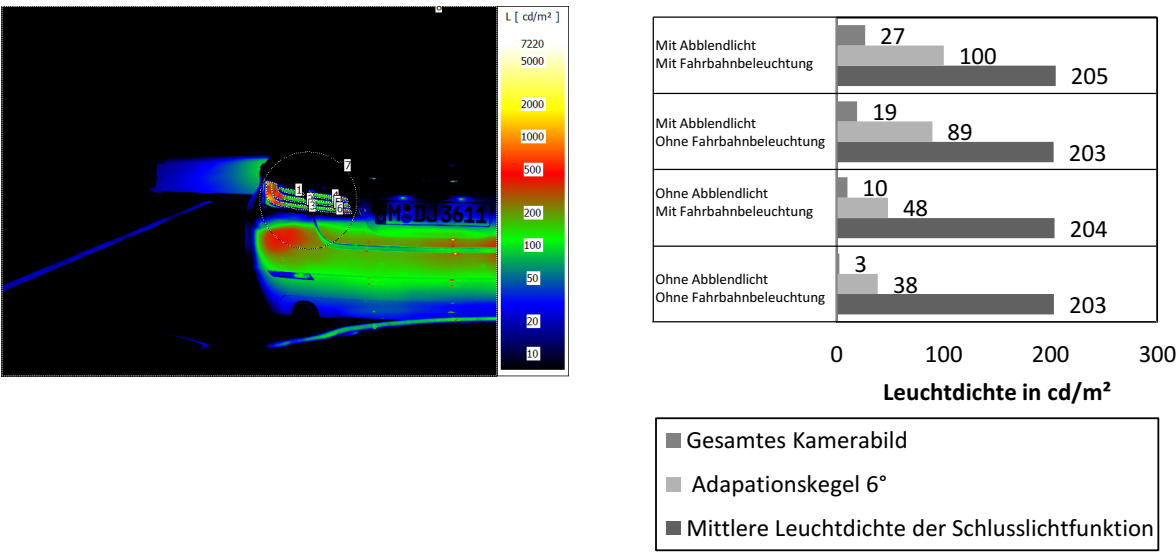


Abbildung 2.46: Öffnungswinkel verschiedener Heckleuchten in einer Entfernung von 4 m

Nach Schmidt-Clausen liegt eine Adaptationsleuchtdichte von 1 cd/m^2 in einer nächtlichen Umgebung mit Berücksichtigung der Fahrbahnbeleuchtung und der Fahrzeugbeleuchtung vor [97]. Im nächtlichen Straßenraum ohne eine Fahrbahnbeleuchtung liegen Adaptationsleuchtdichten von $0,1 \text{ cd/m}^2$ vor [97]. Hierbei wird die Annahme getroffen, dass das Auge allein auf die Straße ($0,1 \text{ cd/m}^2$) adaptiert sei. Damit würden aber Inhomogenitäten in der Leuchte schlechter erkennbar sein. Für eine Worst-Case Betrachtung ist daher die mittlere Leuchtdichte der Leuchte geeigneter.

Zur detaillierteren Ermittlung der Adaptationsleuchtdichte im Straßenverkehrsumfeld sind im Lichtkanal Messungen durchgeführt worden. Der Lichtkanal bietet die Möglichkeit, reale Straßenverkehrsumfeldleuchtdichten mit Hilfe von installierten retroreflektierenden Verkehrszeichen, Fahrbahnmarkierungen und Beleuchtungseinrichtungen reproduzierbar nachzustellen. Um die reale Situation eines ruhenden Verkehrs darzustellen, sind zwei Fahrzeuge hintereinander in einem Abstand von 4 m positioniert. Wie Abbildung 2.47(a) zeigt, werden aus der Sicht

des Fahrers vier Leuchtdichteaufnahmen mit einem 8 mm Objektiv mit einem Öffnungswinkel von 58° horizontal und 43° vertikal erstellt.



(a) Leuchtdichtedarstellung einer nächtlichen Verkehrssituation mit ausschließlich eingeschaltetem Abblendlicht

(b) Gegenüberstellung der Adaptationsleuchtdichte zahlenwerte in verschiedenen Beleuchtungssituation und mit verschiedenen Adaptationskegeln

Abbildung 2.47: Messung der Adaptationsleuchtdichte im nächtlichen Straßenverkehr in einer Kolonnensituation

Bei allen Aufnahmen ist das Abblend- und Schlusslicht des vorderen Fahrzeugs eingeschaltet. Das Umfeld wird für die jeweiligen Aufnahmen insofern geändert, als dass das Abblendlicht sowie die Fahrbahnbeleuchtung ein- und ausgeschaltet werden. Die Kamera befindet sich bei den Messungen in dem Augpunkt des Fahrers des hinteren Fahrzeugs gemäß StVZO §35b [16]. Da die Kamera hinter der Windschutzscheibe positioniert ist, werden für die Auswertung der Ergebnisse die spektralen Transmissionseigenschaften der Scheibe berücksichtigt. In Abbildung 2.47(b) sind die Ergebnisse der Adaptationsleuchtdichte mit einem 6° Kegel, die mittlere Leuchtdichte der Schlusslichtfunktion und die mittlere Leuchtdichte des gesamten Kamerabildes gegenübergestellt, welches Kaltenbach für seine Bestimmung der Adaptationsleuchtdichte verwendet hat [53].

Auf der Netzhaut wird nicht nur ein Bild der leuchtenden Umgebung, sondern auch ein Streulicht erzeugt, das sich additiv überlagert. Bei Blendquellen, z.B. einer Leuchte in dunkler Umgebung, macht sich das Streulicht deutlicher bemerkbar. Dieses Streulicht entsteht durch die Lichtbrechungen an den Grenzflächen von Hornhaut und Linse-Glaskörper sowie durch die Trübungen in den Augenmedien [13]. Die äquivalente Adaptationsleuchtdichte L_q ergibt sich für den statischen Fall nach Gleichung 2.6 aus der additiven Überlagerung aus der

Tabelle 2.5: Werte P für die Pigmentierung der Iris [22]

Augenfarbe	p
schwarz	0
braun	0,5
helle Augen	1
sehr helle blaue Augen	1,2

Schleierleuchtdichte L_{seq} und der Adaptationsleuchtdichte L_{Kegel} .

$$L_q = L_{Kegel} + L_{seq} \quad (2.6)$$

Im CIE-Report 146 ist die Schleierleuchtdichte unter der Berücksichtigung eines Alterungsfaktors age und der Pigmentierung der Iris (p) wie folgt definiert [22]:

$$L_{seq} = E_{glare} \cdot \left[\frac{10}{\Theta^3} + \left[\frac{5}{\Theta^2} + \frac{0,1p}{\Theta} \right] \cdot \left[1 + \left(\frac{age}{62,5} \right)^4 \right] + 0,0025p \right] \quad (2.7)$$

Hierzu sind der Tabelle 2.5 die Beispielwerte für die Pigmentierung der Augen zu entnehmen.

2.4.3 Farbempfindung

Die subjektive Wahrnehmung der Farbvalenzen wird als Farbe bezeichnet. Hierbei ist ein Farbeindruck auf das lineare, additive Ergebnis von drei verschiedenen, angeregten Zapfentypen (S-Zapfen, M-Zapfen und L-Zapfen) mit unterschiedlichen spektralen Sensitivitäten zurückzuführen [82]. Die Empfindlichkeit ist von der individuellen Anatomie und dem Betrachtungswinkel abhängig. Nach DIN 5033 Teil 1 kann mit Hilfe von Farbvalenzen die physiologische Wirkung bzw. die Farbwahrnehmung von Licht aufgrund der drei Empfindlichkeitsfunktionen des Auges quantitativ beschrieben werden [28].

Nach Graßmann genügen drei unabhängige Kennzahlen bzw. Primärvalenzen, um einen Gesamtfarbeindruck bzw. eine Farbvalenz eindeutig zu beschreiben [88]. Für die Empfindung von Farben bedeutet dies, dass Farben mit gleicher Farbvalenz unabhängig von ihren spektralen Zusammensetzungen gleich bewertet werden.

Im Jahre 1931 hat die CIE die Farbwahrnehmung mit Hilfe der 2°-Normfarbwerte X, Y, Z und durch die Definition von 2°-Normspektralwertfunktionen $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$ und $\bar{z}(\lambda)$, festgelegt (siehe Abbildung 2.48) [29]. Die Normfarbwerte stellen hierbei rein virtuelle Primärvalenzen dar, die so in der Natur nicht vorkommen.

Die 2°-Normfarbwerte X, Y, Z einer spektralen Farbreizfunktion φ_λ können mit den Normspektralwertfunktionen $(\bar{x}(\lambda), \bar{y}(\lambda), \bar{z}(\lambda))$ und dem Normierungsfaktor k nach Gleichung 2.8

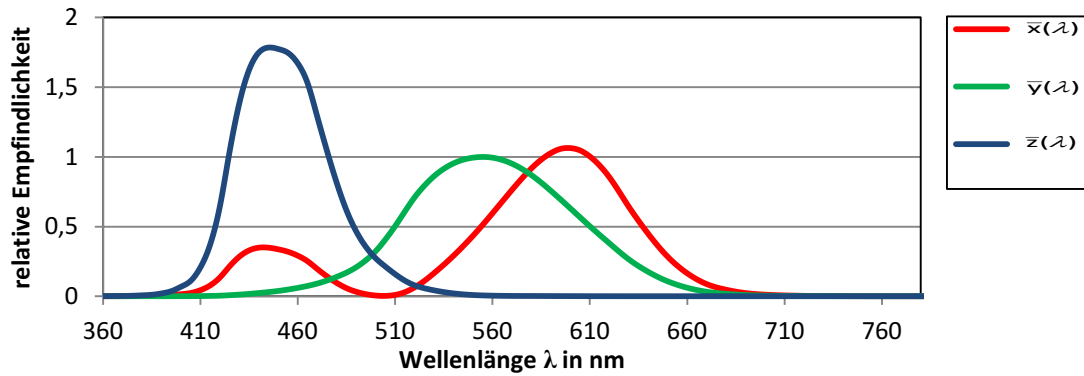


Abbildung 2.48: Normspektralfunktionen für den 2°-Normalbeobachter [29]

bis Gleichung 2.10 berechnet werden [29]:

$$X = k \cdot \int \varphi_{\lambda} \bar{x}(\lambda) d\lambda \quad (2.8)$$

$$Y = k \cdot \int \varphi_{\lambda} \bar{y}(\lambda) d\lambda \quad (2.9)$$

$$Z = k \cdot \int \varphi_{\lambda} \bar{z}(\lambda) d\lambda \quad (2.10)$$

Der Normierungsfaktor k wird für Körperfarben unter zu Hilfenahme der Strahlungsfunktion S_{λ} der beleuchtenden Lichtart so beschrieben, dass sich für einen idealen matt-weißen Körper für jede Lichtart der Normfarbwert $Y_{\text{weiß}} = 100$ ergibt (siehe Gleichung 2.11) [29].

$$k = \frac{100}{\int S_{\lambda} \bar{y}(\lambda) d\lambda} \quad (2.11)$$

Bei einer ausschließlichen Farbbewertung kann durch eine Zentralprojektion auf eine Ebene nach den Gleichungen 2.12 bis 2.15 der durch die Primärvalenzen aufgespannte dreidimensionale Raum um eine Dimension reduziert werden. Die Farbe einer Lichtquelle kann innerhalb der zweidimensionalen CIE-Farbtabelle mit Hilfe des Farbortes dargestellt werden. Der Farbort wird durch die 2°-Normspektralwerte x und y definiert (im weiteren Verlauf der Dissertation Farbwertanteile genannt). Die 2°-Normspektralwertfunktion $\bar{y}(\lambda)$ nimmt eine besondere Stellung ein, da sie der spektralen Hellempfindlichkeit $V_2(\lambda)$ entspricht. Aus den Normfarbwerten X, Y, Z werden die Farbwertanteile x, y, z nach den Gleichungen 2.12 bis 2.15 ermittelt.

$$x = \frac{X}{X + Y + Z} \quad (2.12)$$

$$y = \frac{Y}{X + Y + Z} \quad (2.13)$$

$$z = \frac{Z}{X + Y + Z} \quad (2.14)$$

$$x + y + z = 1 \quad (2.15)$$

In verschiedenen Untersuchungen zu Farbempfindungen wurde festgestellt, dass der Farbabstand im CIE Lxy-Farbraum und in der CIE xy-Farbtabelle nicht gleichabständig ist [65], [66], [9]. Eine Übersicht zu verschiedenen Studien liefern Wyszecki und Stiles [117]. Daher wurden 1976 von der CIE zur Standardisierung der Farbempfindung zwei verschiedene neue Farbräume (CIE-LAB und CIE-LUV) entwickelt, die sich in einer Vielzahl von Anwendungen etabliert haben. Die Farbräume können mit Hilfe von linearen und nicht-linearen Transformationen bestimmt werden. Die Gleichungen 2.16 und 2.17 beinhalten die lineare Transformation der CIE xy-Farbtabelle in die gleichabständige Farbtabelle CIE 1976 mit den Farbwertanteilen u' und v' [30].

$$u' = \frac{4x}{-2x + 12y + 3} \quad (2.16)$$

$$v' = \frac{9y}{-2x + 12y + 3} \quad (2.17)$$

Derzeit sind viele weitere neue Modelle für die Farbwahrnehmung und Farberscheinung, z.B. die CMC-Formel (Clarke et al., 1984), die CIE94-Formel (CIE, 1995), die DIN99-Formel (DIN, 2001) und die CIEDE2000-Formel (CIE, 2001), in Diskussion [30]. Da alle neu definierten Farbräume als Basis die Daten des Normvalenzsystems besitzen, können die Farbräume ineinander umgewandelt werden.

Die Anwendung dieser Modelle ist jedoch sehr komplex. Zudem sind diese für den Einsatz in anderen Branchen (Film- und Druckindustrie) entwickelt worden. Die Halbleiterindustrie gibt in den Datenblättern von den LEDs die Lichtfarbe durch die Farbwertanteile der CIE xy-Farbtabelle an. Da eine einfache Vergleichbarkeit der LEDs mit den neuen komplizierten Farbräumen nicht gegeben ist, erfolgt im Rahmen dieser Arbeit die Auswertung und die Verarbeitung der Daten ausschließlich auf Basis der nahezu gleichabständigen CIE 1976 Farbtabelle und der CIE xy-Farbtabelle. Zudem ist die Farbe von Signalleuchten keine Körperfarbe, sondern eine Lichtfarbe.

2.4.4 Kontrastempfindung

Die Wahrnehmung von Objekten beruht nicht nur auf der Helligkeitsempfindung, sondern auch auf der Kontrastempfindung. Um ein Objekt wahrnehmen zu können, muss dieses sich im Hinblick auf die Helligkeit bzw. die Objektleuchtdichte L_O von seiner Umgebungsleuchtdichte L_U abheben. Unter der Voraussetzung, dass sowohl das Objekt als auch die Umgebung homogen ausgeleuchtet sind, ist der Leuchtdichtekontrast C wie folgt definiert [20]:

$$C = \frac{|L_O - L_U|}{L_U} \quad (2.18)$$

Hierbei kann zwischen einem Positiv- und Negativ-Kontrast unterschieden werden (siehe Abbildung 2.49). Für eine Erkennungswahrscheinlichkeit von 50 Prozent eines Objekts muss der resultierende Kontrast C größer als der Schwellenkontrast C_{th} sein. Hierfür kann die Objektleuchtdichte L_o deutlich größer bzw. deutlich kleiner als die Hintergrundleuchtdichte L_U sein. Der Schwellenkontrast C_{th} ist nach Gleichung 2.19 mit Hilfe der Schwellenleuchtdichte ΔL_{th} wie folgt definiert.

$$C_{th} = \frac{\Delta L_{th}}{L_U} \quad (2.19)$$

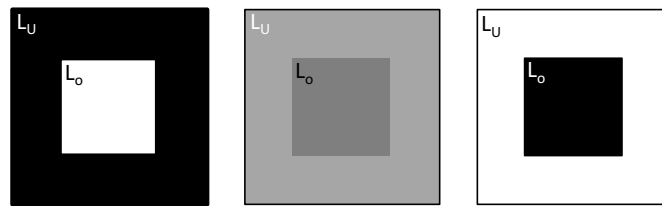


Abbildung 2.49: Kontrastpolarität eines einfachen Testobjekts (links: Positivkontrast, mittig: Tarnung, rechts: Negativkontrast)

In der Literatur sind zwei komplexe Modelle von Adrian und Kokoschka für die Ermittlung eines globalen, statischen Schwellenkontrasts zu finden [2], [55]. Die jeweiligen Modelle sind durch eine Fülle von Parametern gekennzeichnet, die im weiteren Verlauf erläutert werden.

2.4.4.1 Adrian-Modell

In Adrians Modell wird für die Bestimmung eines Schwellenkontrasts eine Vielzahl von geometrischen, photometrischen, chronometrischen und individuellen Parametern berücksichtigt. Gleichung 2.20 zur Bestimmung der Schwellenleuchtdichte setzt sich aus den Faktoren für die Testzeichengröße F_S , die Kontrastpolarität F_{CP} , die Darbietungsdauer F_T und das Alter des

Beobachters F_A sowie einer Konstanten zusammen.

$$\Delta L = 2,6 \cdot F_S \cdot F_{CP} \cdot F_T \cdot F_A \quad (2.20)$$

Der Faktor F_S nach Gleichung 2.21 hängt von der eigentlichen Testzeichengröße α in Bogenminuten und zwei weiteren Faktoren $\Phi^{0,5}$ und $L_f^{0,5}$ ab. Diese sind Funktionen der äquivalenten Adaptationsleuchtdichte und werden näher in Anhang G beschrieben.

$$F_S = \left(\frac{\Phi^{0,5}}{\alpha} + L_f^{0,5} \right)^2 \quad (2.21)$$

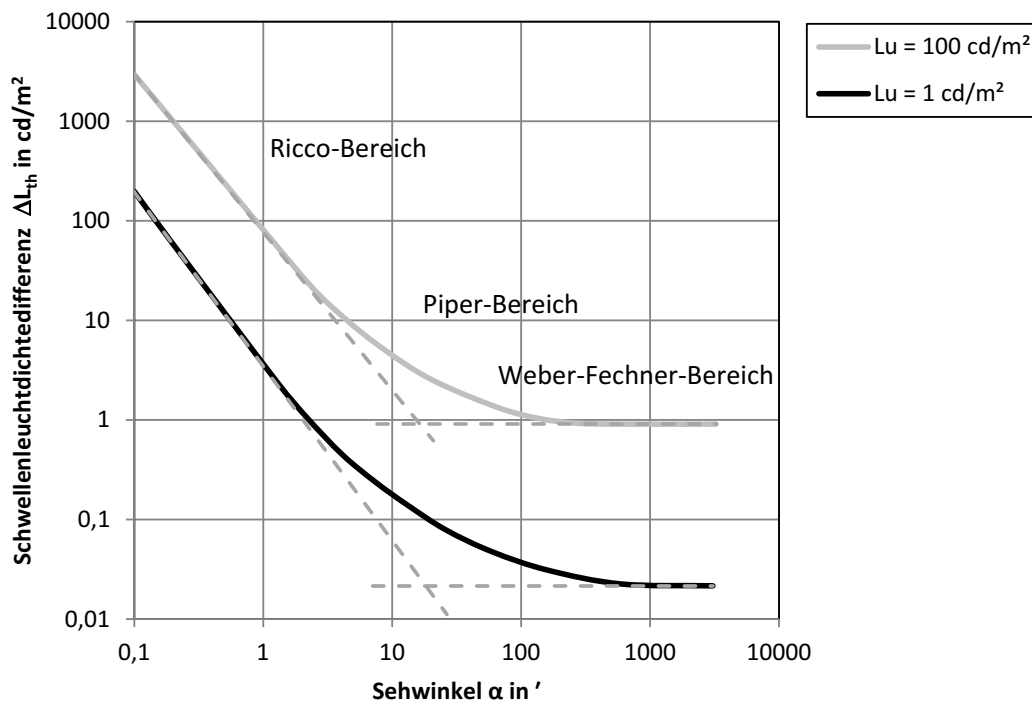


Abbildung 2.50: Schwellenleuchtdichte in Abhängigkeit des Seh winkels nach Adrian [2] (entnommen aus [53])

In Abbildung 2.50 ist die Schwellenleuchtdichte in Abhängigkeit des Seh winkels α gemäß des Faktors F_S dargestellt, der sich aus drei Teilkurven zusammensetzt (siehe Anhang G). Für kleine Winkel (α kleiner als $4'$) hat das Riccosche Gesetz Gültigkeit. Mit einer Verkleinerung der Testzeichengröße steigt neben der Schwellenleuchtdichte ΔL_{th} die Kontrastschwelle C_{th} an. Sobald das Testzeichen einen Seh winkel α größer als $300'$ besitzt, orientiert sich die Schwellenleuchtdichte ΔL_{th} an dem Weber-Gesetz. Dieses besagt, dass das Verhältnis eines Reizunterschieds ΔR zu einem Eingangsreiz R konstant ist [2].

$$k = \frac{\Delta R}{R} \quad (2.22)$$

Mit dem Kontrastpolaritätsfaktor F_{CP} berücksichtigt Adrian in seinem Modell den Effekt, dass Testobjekte mit einem negativen Kontrast in der Regel besser wahrgenommen werden als mit einem positiven Kontrast (siehe Abbildung G.1 in Anhang G). Im Alltag ist dies beim Arbeiten am Bildschirm ersichtlich. Das Lesen von Texten mit schwarzer Schrift auf weißem Hintergrund ist weniger ermüdend als der umgekehrte Fall. Der Faktor F_{CP} ist von der Objektgröße, der Adaptationsleuchtdichte und der bestimmten Schwellenleuchtdichte abhängig, die sich ausgehend von einer zwei Sekunden langen Betrachtungsdauer sowie der Annahme eines Positivkontrasts ergibt.

Der Alterungsfaktor F_A berücksichtigt den Effekt, dass die Transmission des Auges mit zunehmendem Alter auf Grund einer Eintrübung der Linse ab und das Streulicht im Auge zunimmt [114]. Daraus resultiert für ältere Menschen ein höherer Schwellenkontrast. Nähere Informationen zur Berechnung des Faktors F_A sind im Anhang unter G zu finden.

Der Faktor Darbietungsdauer F_T berücksichtigt den Hintergrund, dass eine Erkennung eines Testobjekts umso schwieriger ist je kürzer die Darbietungsdauer ist. Die bisherigen Daten des Adrian Modells basieren auf Darbietungsdauern von zwei Sekunden. Daher ist dieser Faktor nur für Darbietungszeiten von weniger als zwei Sekunden anzuwenden. Nach Gleichung G.3 hängt der Faktor F_T neben der Betrachtungsdauer t von einem weiteren Faktor a ab. Der Faktor a ist eine Funktion der Objektgröße α sowie der äquivalenten Adaptationsleuchtdichte L_q und wird näher in Anhang G erläutert.

2.4.4.2 Kokoschka-Modell

Kokoschkas Modell zur Bestimmung eines Schwellenkontrasts C_{th} basiert auf Untersuchungen von Blackwell, die mit jungen Probanden und einer Darbietungszeit der kreisförmigen Testzeichen von mindestens 15 Sekunden durchgeführt wurden [58]. Daher wird das Modell durch Gleichung 2.23 mit Faktoren für eine „Leuchtdichtefunktion“ f_1 , für eine „Winkelfunktion“ f_2 und mit einer Konstanten \bar{C}_{min} in Abhängigkeit des Sehwinkels α sowie der Objektleuchtdichte L_U beschrieben [58].

$$C_{th} = \bar{C}_{min} \cdot f_1 \cdot f_2 \quad (2.23)$$

Das Riccosche und das Weber-Fechner-Gesetz werden durch beide Faktoren (f_1 und f_2) zur Bestimmung des Schwellenkontrasts C_{th} einbezogen. Sie werden unter Berücksichtigung der Konstanten aus Tabelle 2.6 nach den Gleichungen 2.24, 2.25 und 2.26 bestimmt.

$$f_1 = 1 + \left(\frac{L_u}{c_1} \right)^{c_2} \quad (2.24)$$

$$f_2 = 1 + \left(\frac{\alpha_0}{\alpha}\right)^2 \quad (2.25)$$

$$\alpha_0 = c_3 + c_4 \cdot \left(1 - \frac{1}{1 + (L_u/c_5)^{c_6}}\right) \quad (2.26)$$

Tabelle 2.6: Konstanten des Kokoschka-Modells [55]

$$\begin{array}{llll} \bar{C}_{min} = 0,00275 & c_1 = 0,158 & c_2 = -0,484 & c_3 = 7,5 \\ & c_4 = 133 & c_5 = 0,00075 & c_6 = -0,383 \end{array}$$

2.4.4.3 Lokaler und globaler Kontrast

In der Praxis liegen die zuvor dargestellten Laborbedingungen eines homogenen Hintergrunds nicht vor. Nach Kokoschka hängt die Sichtbarkeit eines Testobjekts nicht ausschließlich vom globalen Adaptationszustand, sondern auch von einem lokalen Kontrast ab [56], [20]. Der lokale Kontrast ergibt sich aus den Leuchtdichten des Testobjekts L_o sowie aus der direkten Umgebung L_u (siehe Abbildung 2.51) [55]. Sowohl das Rechteck mit der Leuchtdichte L_u , als auch die Schrift mit der Leuchtdichte L_o besitzen eine von der äquivalenten Adaptationsleuchtdichte L_q abweichende Leuchtdichte.

Ein Objekt ist dann erkennbar, wenn der Kontrast zwischen dem Objekt und seiner unmittelbaren Umgebung größer ist als der lokale Schwellenkontrast. Analog zu Gleichung 2.18 sind der globale und lokale Kontrast nach Gleichung 2.28 und 2.27 definiert:

$$C_{global} = \frac{\Delta L}{L_q} = \frac{|L_o - L_q|}{L_q} \quad (2.27)$$

$$C_{lokal} = \frac{|L_o - L_u|}{L_u} \quad (2.28)$$

Kokoschka stellt mathematisch den Zusammenhang zwischen dem globalen und lokalen Schwellenkontrast folgendermaßen dar [55]:

$$C_{th_{lokal}} = \frac{1}{4} \cdot C_{th_{global}} \cdot \frac{\left(1 + \frac{L_u}{L_q}\right)^2}{\frac{L_u}{L_q}} \quad (2.29)$$

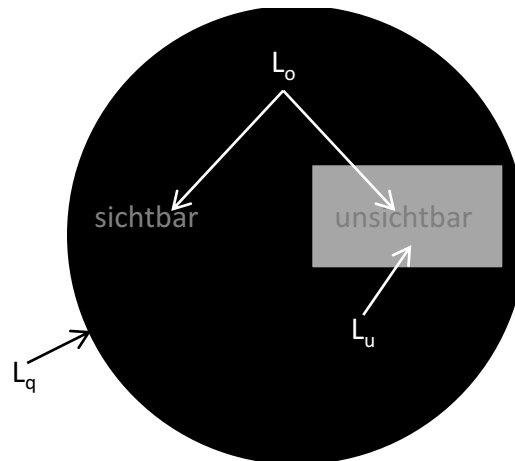


Abbildung 2.51: Lokale Kontrastunterschiede nach Kokoschka [55] (entnommen aus [32])

Im CIE-Report 19.2 stellt Blackwell das „Visibility Level“ vor, das aus dem Verhältnis zwischen dem Schwellenkontrast sowie dem tatsächlichen Kontrast gebildet wird [10].

$$VL = \frac{C}{C_{th}} = \frac{\Delta L}{\Delta L_{th}} \quad (2.30)$$

$$VL = \begin{cases} < 1, \text{ Testzeichen nicht wahrnehmbar} \\ = 1, \text{ Schwellenkontrast erreicht} \\ > 1, \text{ Testzeichen überschwellig wahrnehmbar} \end{cases} \quad (2.31)$$

Das Visibility Level ist ein Gütekriterium zur Bewertung der Erkennbarkeit von Objekten und findet unter anderem in der Bewertung von Straßenbeleuchtungen und Displays Anwendung [5], [32].

2.4.5 Formempfindlichkeit

Die Formempfindlichkeit beschreibt die Fähigkeit des menschlichen Auges, geometrische Formen wahrzunehmen. Bei einfachen Objekten wird die Annahme getroffen, dass die Formempfindlichkeit durch das Auflösungsvermögen beschrieben werden kann. Das Auflösungsvermögen, auch Visus S genannt, ist als der Kehrwert des minimalen Sehwinkels α_{min} in Bogenminuten definiert, unter dem zwei Linien oder Punkte noch als getrennt wahrnehmbar sind [83].

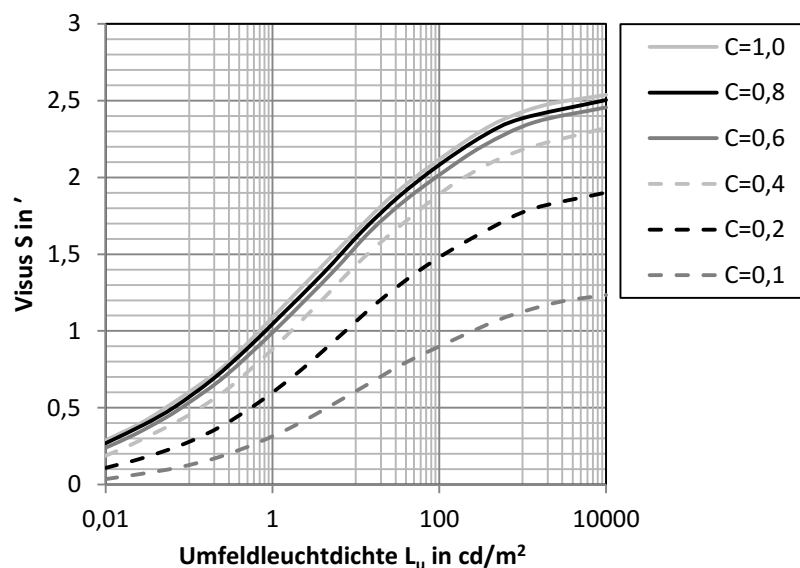
$$S = \frac{1}{\alpha_{min}} \quad (2.32)$$

Tabelle 2.7: Übersicht der physiologischen Faktoren der Formempfindung nach Hentschel [48]

Physiologischen Faktoren der Formempfindung

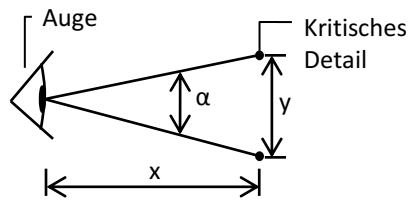
Form, Größe und Kontrast des Leuchtdichteobjekts
 Qualität der optischen Abbildung auf der Netzhaut
 Limitierung des Auflösungsvermögens auf Grund von Beugung an der Augenpupille
 Ortsabhängigkeit der Anzahl der lichtempfindlichen Rezeptoren auf der Netzhaut
 Adaptationszustand
 Augenbewegungen

Von den Faktoren aus Tabelle 2.7 hat insbesondere der Adaptationszustand einen großen Einfluss auf den Visus. Dies wird in Abbildung 2.52 für eine normalsichtige Person für die foveale und statische Betrachtung gezeigt. Eine normalsichtige Person hat bei einer Adaptationsleuchtdichte von 1 cd/m^2 ein räumliches Auflösungsvermögen von bis zu einer Bogenminute [57].

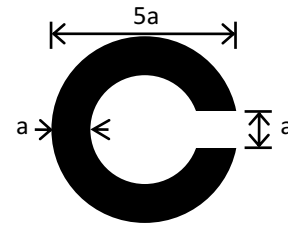
Abbildung 2.52: Sehschärfe von dunklen Landoltringen in Abhängigkeit von der Umfeldleuchtdichte L_u und des Kontrasts c [57]

In Abhängigkeit der Entfernung x sowie des Abstands y zwischen dem kritischen Detail ist der Sehwinkel α bestimmbar, wie in Abbildung 2.53(a) gezeigt. Die europäische Norm EN ISO 8596 schreibt für die Messung des Visus den Landoltring aus Abbildung 2.53(b) vor, welcher in acht verschiedenen Orientierungen eine Lücke besitzt. Bei der Messung des Auflösungsvermögens muss der Beobachter die Orientierung des Rings in 60% der Fälle erkennen [108].

Jedoch kann für komplexe Formen, wie z.B. derzeit im Straßenverkehr eingesetzte Signalleuchten, keine allgemein gültige mathematische Beziehung für die Formempfindlichkeit angegeben werden, da die Formempfindlichkeit nicht ausschließlich von den physiologischen Faktoren aus Tabelle 2.7 abhängig ist, sondern auch von Lern- und Erinnerungsvorgängen des Formsinns [48]. Nach Hloucal und Walter bedeutet dies, dass ein und derselbe physikalische Reiz



(a) Bestimmung der Sehschärfe mit zwei Punkten



(b) Landoltring als Testobjekt für die Sehschärfenermittlung [108]

Abbildung 2.53: Definition und Testobjekt zur Bestimmung der Sehschärfe

in Abhängigkeit vom Kontext unterschiedlich wahrgenommen wird [49], [111]. Diese Aussage begründet zugleich weshalb die menschliche Formempfindung einerseits so leistungsfähig ist und andererseits durch optische Täuschungen beeinflussbar ist. Auf Grund einer kontextbasierten Bewertung ist der Mensch dazu in Lage, Formen zu bestimmen, obwohl diese als solche gar nicht erkennbar sind (vgl. Abbildung 2.54 links). Außerdem ist eine Formenerkennung auf Grund von verschiedenen Texturen möglich (vgl. Abbildung 2.54 rechts) [68].

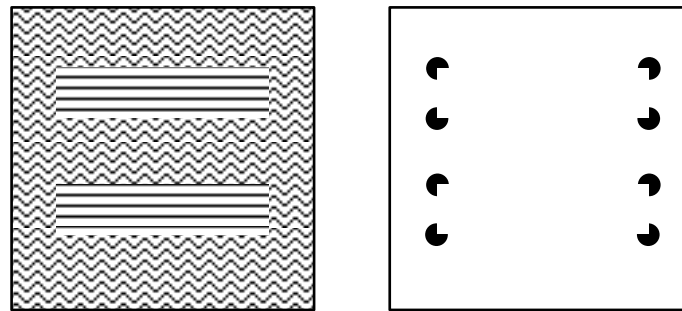


Abbildung 2.54: Beispiele für die Leistungsfähigkeit der menschlichen Formempfindung, links: verschiedene Texturen; rechts: Darstellung zweier Balken analog eines Kanizsa-Dreiecks

Abbildungen 2.55(a) und (b) stellen Beispiele für die Beeinflussung des menschlichen Urteilsvermögens durch Optische Täuschungen dar. Hierfür ist in Abbildung 2.55(a) die sogenannte „Ebbinghaus-Täuschung“ dargestellt. Auf Grund des Kontexts erscheinen die beiden inneren Kreise der Figuren unterschiedlich groß, in der Realität besteht jedoch kein Größenunterschied. Die Abbildung 2.55(b) zeigt die „Ware-Täuschung“. Hierbei besitzen die beiden Flecken links und rechts von der Mitte dieselbe Beschaffenheit, jedoch wirken sie wegen der umliegenden Textur unterschiedlich [113].

In der Literatur ist dieses Phänomen unter dem Begriff des Kontrast-Effekts bekannt [113], [67]. Kontrast-Effekte bewirken, dass physikalische Reize in Abhängigkeit der Umgebung übersehen oder überbewertet werden.

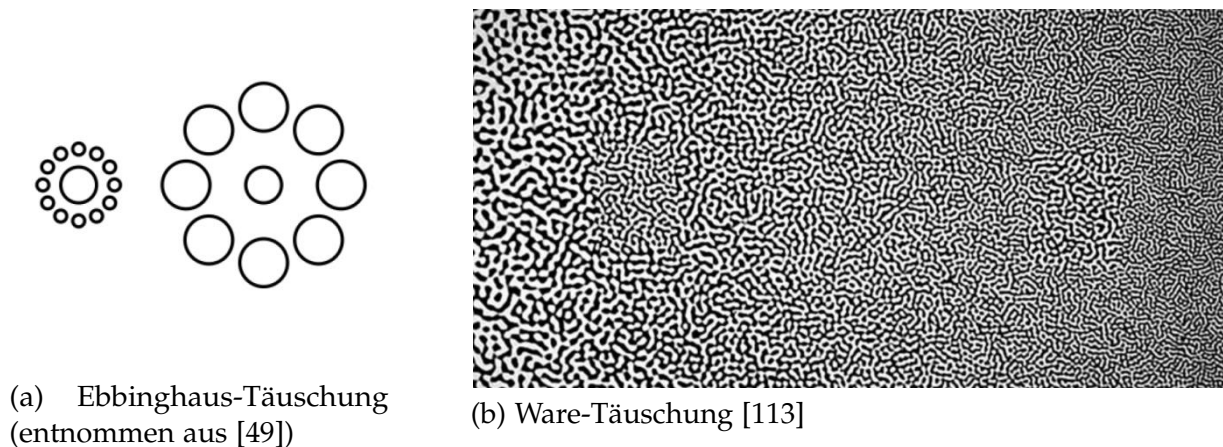


Abbildung 2.55: Optische Täuschungen

Das Lern- und Erinnerungsvermögen kann allgemein durch verschiedene Aspekte geprägt worden sein. Der Beobachter kann im Straßenverkehr alltäglich bewusst und unbewusst verschiedene Arten von Signalleuchten betrachten und hinsichtlich der Homogenität bewerten. Bei der Betrachtung des Kalt- und Warmzustands der Leuchte des eigenen Fahrzeugs kann sich ein Beobachter davon überzeugen, dass die Formgebung der Signalleuchte in beiden Zuständen identisch bleibt. Sieht der Beobachter Inhomogenitäten, so werden ihm diese unter anderem durch eine veränderte Formgebung der Signalleuchte bewusst.

2.4.6 Störfempfindung

Die Störfempfindung beschreibt den menschlichen Prozess, ein Merkmal, zum Beispiel eine Inhomogenität in einer Signalleuchte, bewusst wahrzunehmen und hinsichtlich eines Bewertungssystems zu klassifizieren.

Die Art der Klassifizierung ist unter anderem durch die Bewertungsreferenz, die persönliche Einstellung, die Tagesform und das Wahrnehmungsniveau (Detektion, Diskrimination, Identifikation, Klassifikation) gezeichnet. Die Messmethode innerhalb einer Probandenstudie kann einen Einfluss auf die Bewertung der Homogenität nehmen [7], [70].

Die menschliche Bewertung von Merkmalen erfolgt durch kognitive Vergleiche zwischen einem Testobjekt mit einem Referenzobjekt. Da die Auswahl eines Referenzobjekts durch die Lern- und Erinnerungsvorgänge eines Menschen geprägt werden, ist die Homogenitätsbewertung individuell. Der kundenseitige Anspruch an die Homogenität von Signalleuchten nimmt stetig zu, da die heutigen Signalleuchten im Vergleich zu älteren Leuchten im Hinblick auf die Homogenität kontinuierlich verbessert werden konnten (vgl. Kapitel 2.1.3).

Die persönliche Einstellung beschreibt rein subjektive Faktoren, zum Beispiel das ästhetische Empfinden und den persönlichen Qualitätsanspruch. Da die Störfempfindung rein subjektiv ist,

kann eine Messung und eine objektive Bewertung einer Störgröße nur mit Hilfe einer Probandenstudie erfolgen. Die Bewertung der Homogenität ist stets mit einer Streuung behaftet.

Diese genannten Abweichungen können in der Regel auf ein Missverständnis bezüglich der Skalierungsaufgabe oder der Motivation sowie auf eine meinungslose, unkritische Haltung (Akquieszenz) des Probanden zurückgeführt werden. Weitere systematische Beeinflussungsfaktoren sind auf die physische Konstitution, die Ermüdung, die soziale Erwünschtheit, die Tendenz zur Mitte eines Probanden sowie durch Trainingseffekte und das Erinnerungsvermögen zurückzuführen. Ein weiterer Einflussfaktor auf die Bewertung der Homogenität stellt die Tagesform einer Person dar. Diese wird durch emotionale (Stress, Entspannung, Interesse, usw.) sowie physische Faktoren (Müdigkeit, Aufmerksamkeitsgrad, usw.) beeinflusst [7], [70]. Im Rahmen dieser Arbeit wird die Annahme getroffen, dass lichttechnische Vorkenntnisse einen Einfluss auf die Bewertung nehmen, da ein Experte häufig kritischer ist als ein Laie.

Des Weiteren muss berücksichtigt werden, dass die in Abschnitt 2.4.5 genannten Kontrasteffekte (z.B. durch optische Täuschungen) die Störempfindung beeinflussen. So führen positive Kontextinformationen zu negativeren Bewertungen und negative Kontextinformationen zu positiveren Bewertungen. Übertragen auf die nachfolgenden Homogenitätsuntersuchungen bedeutet dies, dass eine leuchtende Fläche (z.B. ein Lichtleiter) inhomogener wirkt, wenn diese mit einer umliegenden homogenen Flächen verglichen werden. Der genau entgegengesetzte Effekt tritt ein, wenn sich die zu bewertende Fläche im Umfeld einer inhomogenen Fläche (z.B. umliegende inhomogen leuchtende Streuscheibe) befindet.

2.4.7 Verminderung der Sehleistung im Alter

Der Sehapparat des Menschen wird in Abhängigkeit des Alters deutlich leistungsschwächer. Dies ist unter anderem darin begründet, dass sich die Linse des Auges im Laufe der Jahre eintrübt (vgl. Abbildung 2.56). Da sich somit der Transmissionsgrad der Linse verringert, benötigen ältere Menschen mehr Licht. Jedoch gilt es zu berücksichtigen, dass die Sehleistung wegen einer höheren physiologischen Blendempfindung gleichzeitig abnimmt, da der Durchmesser der Pupille vermindert variiert werden kann [48]. Daher ist eine optimale Anpassung des Sehapparats an die Umgebungshelligkeiten nur limitiert möglich [54].

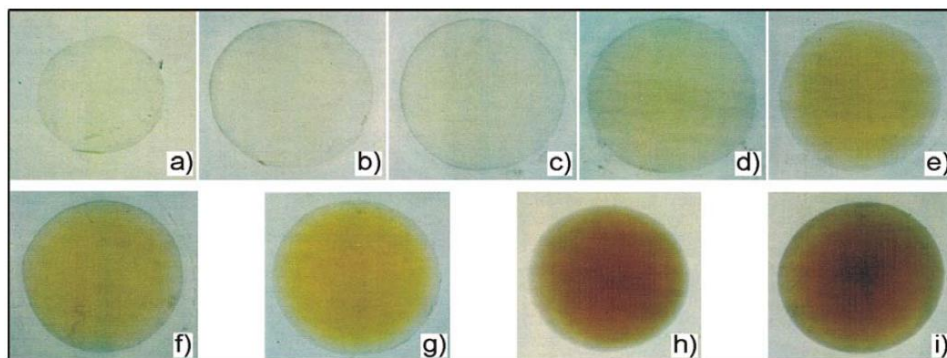


Abbildung 2.56: Linsen verschieden alter Menschen: a) 6 Monate, b) 8 Jahre, c) 12 Jahre, d) 25 Jahre, e) 47 Jahre, f) 60 Jahre, g) 70 Jahre, h) 82 Jahre, i) 91 Jahre, nach [64] entnommen aus [54]

Des Weiteren nimmt die Brechfähigkeit des Auges wegen der verminderten Elastizität der Linse im fortschreitenden Alter zunehmend ab. Schon bei einer normalsichtigen Person ab 40 Jahre verringert sich die Brechkraft um circa 60 Prozent im Gegensatz zu einer 18 Jahre alten Person. Im Alltag ist dies unter der so genannten Altersweitsichtigkeit bekannt [98].

Ältere Menschen sind jedoch auf Grund von Erfahrungen beim Erkennen von Objekten in der Lage, die physiologische Verminderung der Sehleistung teilweise zu kompensieren [54].

Dennoch wird die Annahme getroffen, dass wegen der altersabhängigen Sehleistung jüngere Menschen kritischer hinsichtlich der Homogenitätsbewertung als ältere Menschen sind.

3 Gütekriterien zur Bewertung von Inhomogenitäten

3.1 Anforderungen an die Gütekriterien

Die Anforderungen an die Gütekriterien zur Bewertung farb- und helligkeitsbasierter Inhomogenitäten sind vielfältig. Sie sollen eine oder mehrere Kennzahlen liefern, mit denen eine Probandenbewertung im Hinblick auf die Homogenität objektiv und robust prädictiert werden kann. Dies soll für alle aufgezeigten Klassen von Inhomogenitäten möglich sein.

Zusätzlich muss beachtet werden, dass Signalleuchten in der Regel aus mehreren Teilen bestehen und sich in der Dimension und in der Formgestaltung geometrisch unterscheiden. Da der Gesetzgeber einen gewissen Spielraum im Helligkeitsniveau, im farblichen Erscheinungsbild sowie im Sichtbarkeitswinkel einer automobilen Lichtfunktion lässt und für verschiedene Lichtfunktionen z.B. dem Positionslicht und Tagfahrlicht stark unterschiedliche Lichtniveaus vorschreibt, sollte das Gütekriterium unabhängig von der Lichtfunktion einsetzbar sein. Des Weiteren ist eine Unabhängigkeit vom Adaptationsniveau wünschenswert.

Damit die Gütekriterien nicht nur unter Laborbedingungen anwendbar sind, sollten die Kriterien unabhängig von der Messentfernung zwischen dem Versuchsobjekt und der Messtechnik vergleichbar anwendbar sein. Um sich von diesen Abhängigkeiten zu lösen, werden Worst-Case Betrachtungen analog zu den in Abschnitt 2.2 vorgestellten Szenarien und Inhomogenitäten durchgeführt.

Abschließend sollen mit den Gütekriterien Grenzwerte ermittelt werden, mit denen die menschliche Akzeptanzschwelle geschlechts- sowie altersneutral im Hinblick auf Homogenität bestimmt werden kann.

3.2 Globale und lokale Auswertung der Gütekriterien

Es werden verschiedene Arten von Gütekriterien auf deren Verwendbarkeit zur objektivierten Bewertung der farb- und helligkeitsbedingten Inhomogenität geprüft. Einige der verwendeten Gütekriterien sind teilweise in verschiedenen Bereichen der Lichttechnik in Verwendung. Andere Kriterien sind im Rahmen dieser Arbeit entwickelt worden. Es wird hierbei zwischen Gütekriterien für die Helligkeits- (GH) und Farbbewertung (GF) unterschieden. Es ist anzumerken, dass die bei den Versuchen eingesetzten Lichtkomponenten stets mehrere leuchtende

Teilflächen besaßen und die Anzahl zwischen zwei und acht Flächen variierte. Daher wird unabhängig voneinander untersucht, ob die schlechteste Teilfläche oder das gesamte Erscheinungsbild aller Teilflächen die Probandenbewertung maßgeblich beeinflusst (siehe Abbildung 3.1).



Abbildung 3.1: Darstellung von globalen und lokalen Bewertungsregionen

3.3 Bewertung der Homogenität von Signalfunktionen im Hinblick auf Farbigkeit

3.3.1 MacAdam Ellipsen

Farbunterschiedsempfindungen können quantitativ durch den euklidischen Abstand zweier Farborte bewertet werden. MacAdam konnte jedoch in seinen Untersuchungen zur Farbempfindung ermitteln, dass der Farbabstand in der CIE xy-Farbtabelle nicht gleichabständig ist [65], [66].

Hierfür hat MacAdam einen Versuchsstand aufgebaut, mit dem ein Proband einen Farbunterschied anhand von aneinander grenzenden Halbkreisflächen (Auflösung 2°) monokular bewerten konnte. Das Testfeld war homogen mit 47,8 cd/m² und das Umfeld mit 23,9 cd/m² ausgeleuchtet. Im Rahmen der Untersuchungen hat ein geübter Proband circa 25.000 Proben an 25 Referenzfarborten bewertet [65].

Das Ergebnis des Versuchs ist in Abbildung 3.2 dargestellt. Zur Erkennbarkeit der Orientierung und der Form sind die Ergebnisse in Abbildung 3.2 in 10-facher Vergrößerung dargestellt. Innerhalb des Farbbereichs einer Ellipse kann eine Farbart nicht von der Farbvalenz des Mittelpunktes der Fläche unterschieden werden.

MacAdam zeigte, dass die Wahrnehmung von Farbunterschieden in der CIE xy-Farbtabelle mit Hilfe der *standard deviations of color matching* nach Gleichung 3.1 mit den Parametern g_{11} , g_{12} und g_{22} beschrieben werden kann:

$$g_{11}dx^2 + 2g_{12}dxdy + g_{22}dy^2 = 1 \quad (3.1)$$

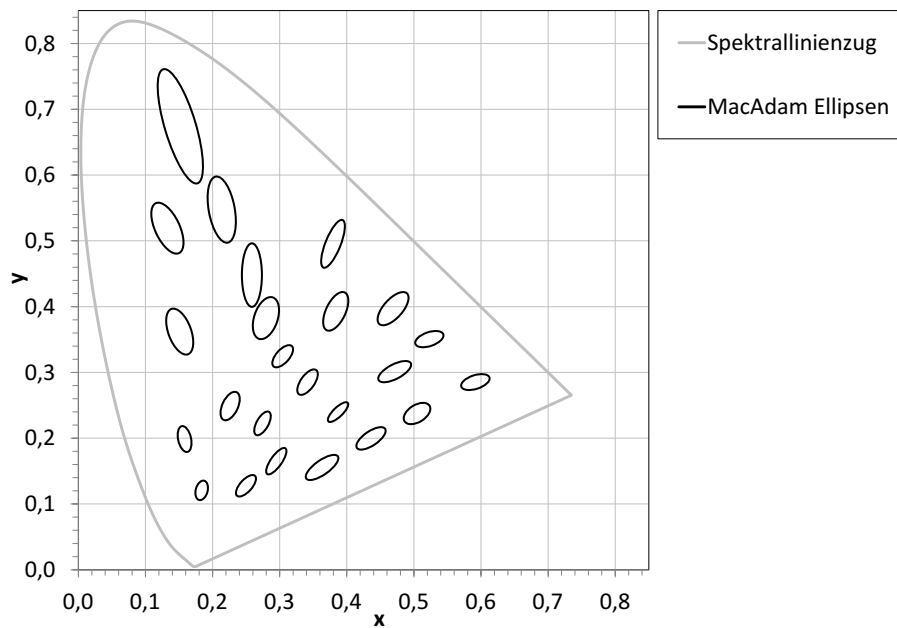


Abbildung 3.2: 10-fach vergrößerte MacAdam Ellipsen nach [65] (entnommen aus [52])

Die *standard deviations of color matching* sind mathematisch nichts anderes als parametrisierte Beschreibungen einer gedrehten Einheitsellipse, bei der dx sowie dy dem Abstand zwischen dem Mittelpunkt (x_0, y_0) und einem Punkt (x_i, y_i) auf der Ellipse entspricht.

MacAdam bestimmte zeichnerisch aus den Versuchsdaten die Parameter der allgemeinen Ellipsengleichung in der Ebene nach Gleichung 3.2 und überführte diese in die Parameterform nach Gleichung 3.1. Die allgemeine Ellipsengleichung verwendet den Ellipsenmittelpunkt (x_0, y_0) , die Ausdehnung der großen- und kleinen Halbachse (a, b) sowie die Neigung der Ellipse zur x-Farbwertanteilachse (φ) zur Beschreibung.

$$\frac{((x - x_0) \cdot \cos(\varphi) - (y - y_0) \cdot \sin(\varphi))^2}{a^2} + \frac{((x - x_0) \cdot \sin(\varphi) - (y - y_0) \cdot \cos(\varphi))^2}{b^2} = 1 \quad (3.2)$$

Ausgehend von den 25 Ellipsen stellte MacAdam in mehreren Diagrammen Parameter zur Verfügung, mit denen innerhalb der gesamten CIE xy-Farbtabelle an einem beliebigen Ort eine Ellipse zur Bewertung des Farbunterschieds berechnet werden kann [66]. Die Ermittlung der Parameter wird in [66] jedoch nicht erläutert. Die in Abbildung 3.2 dargestellten Ergebnisse von MacAdams Untersuchungen zeigen, dass sich die Größe und Orientierung der Ellipse in Abhängigkeit des Referenzfarbortes verändern.

In einer weiteren Studie fand MacAdam heraus, dass für die Bewertung von gerade wahrnehmbaren Farbunterschieden nicht die von ihm ermittelte *standard deviations of color matching* verwendet werden sollte, sondern eine dreifach so große Ellipse (3-step MacAdam Ellipse) [117].

In anderen Untersuchungen wurde das Prinzip zur Bewertung von Farbunterschieden durch die *standard deviations of color matching* aufgegriffen. So definiert das American National Standards Institute (ANSI) eine 4-step MacAdam Ellipse als Toleranzkriterium für eine Leuchtstofflampen [3]. Diese Ausdehnung der Ellipsen konnte Narendran ebenfalls in seinen Untersuchungen zur Bewertung von Farbunterschieden in mehrfarbigen Bildschirmen belegen [75].

Nach Untersuchungen von Bieske zur dynamischen Änderungen von Lichtfarben im Bereich der Raumbeleuchtung kann eine Variation innerhalb von einer 5-step MacAdam Ellipse bei Referenzfarbtemperatur größer 4700 K erfolgen. Bieske konnte ebenfalls feststellen, dass die Schwellenwerte für dynamische Lichtänderungen auf örtliche Lichtfarbenunterschiede übertragbar sind [9]. Andere Untersuchungen von Vasconez zeigen, dass bereits Farbunterschiedsgrenzen mit einer Dimension einer 4-step MacAdam Ellipse zu großzügig für eine weniger komplexe Beleuchtungsszene sind [109].

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die Größe der Ellipsen von verschiedenen Faktoren wie der Komplexität der zu beobachtenden Szene, der Helligkeit und der Referenzfarbvalenz abhängt [74].

3.3.2 Rechnerische Bestimmung von Ellipsen gleicher Farbwahrnehmung

Bei allen zuvor genannten Untersuchungen werden die Ergebnisse über verschiedene Methoden an die *standard deviations of color matching* angepasst. Ob die ermittelten Ergebnisse andere Ellipsen gleicher Farbwahrnehmung mit unterschiedlichen Ausdehnungen und Orientierungen hervorrufen, wird in diesen Untersuchungen nicht überprüft. Daher erfolgt unabhängig von den vorgeschlagenen MacAdam Ellipsen eine mathematische Bestimmung von Ellipsen gleicher Farbwahrnehmung.

Die mathematische Bestimmung von Ellipsen aus mehreren Farborten in der CIE xy- bzw. u'v'-Farbtafel lässt sich auf die Minimierung des kleinsten quadratischen Fehlers E (engl. *Least-Square Error* - LSE) zurückführen.

Für die Lösung des LS Problematik stehen verschiedene Algorithmen aus unterschiedlichen technischen Bereichen zur Verfügung [47], [39]. Die Lösung des LS Problems erfolgt auf Basis eines quadratischen Gleichungssystems, indem die zu ermittelnden Ellipsenparameter mit Hilfe des Gauß-Algorithmus bestimmt werden. Mit $A(n) = X^T(n)X(n)$ und $\vec{b}(n) = X^T(n)y(n)$

gilt:

$$\min_{g(n)} \|X(n)\vec{g}(n) - \vec{o}(n)\|_2^2 \Leftrightarrow A(n)\vec{g}(n) = \vec{b} \quad (3.3)$$

Der rechte Teil der Gleichung 3.3 ist als deterministische Normalengleichung bekannt. Die Matrix A ist eine $M \times M$ dimensionale symmetrisch positiv definite Matrix, mit der ein überbestimmtes Gleichungssystem X mit dem Gaußalgorithmus und einer nachfolgenden Rücksubstitution für die Bestimmung von Ellipsenparameter g eindeutig gelöst werden kann [44].

Zur Beschreibung der mathematischen Problemstellung durch die $M \times n$ Matrix X wird für jede Zeile ein Polynom zweiter Ordnung verwendet, mit dem Kegelschnitte wie Hyperbeln, Kreise und Ellipsen mathematisch parametrisiert werden können (siehe Gleichung 3.4 und 3.5). Der Vektor \vec{o} entspricht dem Ergebnis der Kegelschnittgleichung 3.4 und stellt somit den Einheitsvektor $\vec{o}(n)$ dar [14].

$$g_{11}x^2 + g_{12}xy + g_{22}y^2 + g_{13}x + g_{23}y = 1 \quad (3.4)$$

$$\min_{g(n)} \left\| \underbrace{\begin{pmatrix} x_1^2 & x_1y_1 & y_1^2 & x_1 & y_1 \\ x_2^2 & x_2y_2 & y_2^2 & x_2 & y_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_n^2 & x_ny_n & y_n^2 & x_n & y_n \end{pmatrix}}_{X(n)} \cdot \underbrace{\begin{pmatrix} g_{11} \\ g_{12} \\ g_{22} \\ g_{13} \\ g_{23} \end{pmatrix}}_{\vec{g}(n)} - \underbrace{\begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}}_{\vec{o}(n)} \right\|_2^2 \quad (3.5)$$

Dieses Verfahren wird in Form eines Algorithmus implementiert und für die Bestimmung von Ellipsen gleicher Farbwahrnehmung verwendet (siehe Kapitel 4). Da jedoch die Ellipsen in der Regel gedreht und ihre Mittelpunkte nicht im Koordinatenursprung in der CIE-Farbtabelle liegen, sind zusätzliche Transformationen notwendig, um den Ellipsenmittelpunkt (x_0, y_0) , die Ausdehnung der großen und kleinen Halbachse (a, b) sowie die Neigung der Ellipse zur x-Farbwertanteilachse (φ) zu bestimmen. Diese Transformationen sind im Anhang unter C.7.1 zu finden.

Für nachfolgende Approximation der Ellipsen müssen mindestens fünf Farborte so ausgewählt werden, dass diese durch den Abstand zum Referenzfarbort (x_0, y_0) die Farbdiskrimination des Auges beschreiben. Um die Robustheit der Ellipsenapproximation zu erhöhen, dürfen die ausgewählten Farborte nicht punktuell in einem Bereich des Ellipsenumfangs sondern sternförmig verteilt sein, da so die Kondition der Matrix verbessert werden kann (siehe Abbildung 3.3) [44].



(a) Sternförmige Verteilung der Farborte

(b) Punktueller Verteilung der Farborte

Abbildung 3.3: Beispielhafte Darstellung der Auswirkungen der Eingangsfarbortverteilung auf die Ellipsenapproximation

3.4 Bewertung der Homogenität von Signalfunktionen im Hinblick auf Helligkeit

In der Literatur sind derzeit verschiedene Gütekriterien zur Bewertung der Homogenität bekannt. Diese in Abschnitt 3.4.1 bis 3.4.3 vorgestellten Kriterien sind für unterschiedliche Themengebiete wie die Bewertung der Arbeitsplatzbeleuchtung, die Ausleuchtung des Verkehrsraums durch Straßenbeleuchtungseinrichtungen sowie für die Bewertung der Fahrbahnbeleuchtung mit Kraftfahrzeugscheinwerfern konzipiert und entwickelt worden. Die genannten Verfahren basieren ursprünglich auf der Analyse von Kontrasten bzw. Gradienten von Beleuchtungsstärken.

Speziell entwickelte Gütekriterien für die Bewertung der Homogenität von Signalfunktionen im Hinblick auf die Helligkeit eines Erscheinungsbilds sind derzeit nicht bekannt. Es wird die Annahme getroffen, dass die in den Abschnitten 3.4.1 bis 3.4.3 vorgestellten Gütekriterien für die Bewertung von Signalleuchten herangezogen werden können. Die in Abschnitt 3.4.1 bis 3.4.3 vorgestellten Gütekriterien basieren auf statischen Bewertungsmethoden mit Extremwerten und Streuungsparametern.

Es wird die These aufgestellt, dass mit den zuvor genannten Gütekriterien keine zufriedenstellende Bewertung der Homogenität erfolgen kann, da im Rahmen von Probandenstudien keine hohe Korrelation zwischen der objektiven und subjektiven Bewertung erzielt werden konnte. Bestätigt wurde diese These zum Teil von Hahn mit seinen Probandenuntersuchungen an vier Heckleuchten unter der Verwendung von statistischen Bewertungsmethoden mit Extremwerten und Lageparametern nach DIN 5035-8 [45].

Dies liegt in den Eigenschaften und der messtechnischen Erfassung der Gütekriterien begründet. Insbesondere bei statischen Bewertungsmethoden mit Extremwerten kann das Ergebnis der Gütekriterien durch Ausreißer verfälscht werden. Ausreißer können sowohl real innerhalb einer vermessenen Leuchte vorhanden sein als auch infolge der Messtechnik sowie der Messmethode in Erscheinung treten. So können in einem ortsauflösenden Leuchtdichtebild sehr

große Helligkeitsausreißer vorhanden sein, die z.B. durch eine starke Vergrößerung des Bildes, defekte Sensorstellen oder durch eine Linsenverschmutzung bedingt sind. Da diese genannten Ausreißer auf die technischen Eigenschaften der verwendeten Messgeräte zurückzuführen sind, werden auf Basis dieser Voraussetzungen Ergebnisse der Inhomogenitätsbewertung ermittelt, die sich so in der Realität für einen menschlichen Beobachter nicht ergeben.

Daher werden in Abschnitt 3.4.2 neben den statischen Bewertungsmethoden mit Extremwerten ebenfalls statistische Bewertungsmethoden mit Lageparametern vorgestellt und im Zuge einer späteren Korrelationsanalyse bewertet. Der Median und auch Quantile gehören zu der Gruppe der Lageparameter. Beurteilungsmethoden in Abhängigkeit von Lageparametern bieten im Gegensatz zu extremwertbasierten Methoden den Vorteil gegenüber Ausreißern robuster zu sein.

Da alle zuvor vorgestellten Gütekriterien mit Hilfe eines Quotienten aus Extremwerten sowie Lage- oder Streuungsparametern bestimmt werden, geht der Vorteil der ortsauflösenden Leuchtdichtemessung verloren. Die Gütekriterien geben keine Auskunft hinsichtlich der örtlichen Verteilung, der Anzahl und der flächigen Ausdehnung von Inhomogenitäten. Im Hinblick auf die menschliche Formempfindung kann dies unter dem Gesichtspunkt der Homogenitätsbewertung ein Nachteil sein, den es in einer späteren Korrelationsanalyse zu überprüfen gilt. Zusätzlich ist es möglich, dass eine Robustheit der zuvor genannten Gütekriterien bei Signalleuchten mit gleichmäßigen Strukturen (Prismen in Lichtleitern) im Gegensatz zu unstrukturierten Flächen (glühender Körper) nicht gegeben ist. Auch weitere Randbedingungen wie das Adaptationsumfeld, das Alter des Beobachters sowie Eigenschaften der Leuchte, wie z.B. die Größe und die Geometrie, werden nicht berücksichtigt.

Daher werden in den Abschnitten 3.4.4, 3.4.5 und 3.4.6 weitere Gütekriterien auf Basis einer Gradienten- und Schwerpunktmethodik sowie unterschiedlichen Kontrastschwellenmodellen vorgestellt.

3.4.1 Statistische Bewertungsmethode mit Extremwerten

In DIN 5035-8 ist ein Gütekriterium (g_2) auf Basis von Extremwerten zur Bewertung einer gleichmäßigen Ausleuchtung an Arbeitsplätzen definiert [27]. Das Kriterium g_2 wird in Abhängigkeit von den Minimal- und Maximalwerten verschiedener Messpunkte einer Fläche bestimmt (siehe Gleichung 3.6).

$$g_2 = \left(\frac{E_{min}}{E_{max}} \right) \quad (3.6)$$

Diese Beziehungen finden ebenfalls bei der Bewertung der Auslegung einer Fahrbahnbeleuchtung mit Straßenleuchten Anwendung [50].

Wie aus Kapitel 2.4 hervorgegangen ist, ist die menschliche Fähigkeit der Kontrastempfindung ausschlaggebend für die Wahrnehmung und Bewertung von Inhomogenitäten. Daher wird im Zuge der Homogenitätsbewertung von Signalleuchten die vorgeschlagene Formel zur Bestimmung von g_2 aus DIN 5035-8 grundsätzlich so modifiziert, dass statt der Beleuchtungsstärke E die Leuchtdichte L verwendet wird. Die Anwendung der Formel zu g_2 nach DIN 5035-8 findet sich im Lastenheft zur Bewertung der Homogenität von Signalleuchten bereits in leicht veränderter Form wieder (siehe Gleichung 3.7). Hierbei wird ein Quotient für das Gütekriterium GK_1 aus dem maximalen und minimalen Leuchtdichtewert (L_{max} und L_{min}) einer Messregion gebildet und zusätzlich auf Grund der menschlichen Wahrnehmung logarithmiert.

$$GK_1 = \log \left(\frac{L_{max}}{L_{min}} \right) \quad (3.7)$$

Zwei weitere Methoden verwenden in Anlehnung an die Formel 2.18 zur Kontrastbestimmung zusätzlich den Leuchtdichtemittelwert \bar{L} einer Messregion, um das Helligkeitsniveau der betrachteten, leuchtenden Fläche zu berücksichtigen. Dies wird in den beiden folgenden Bewertungskriterien aufgegriffen und in Verbindung mit dem Mittelwert gebracht.

$$GK_2 = \frac{L_{max} - \bar{L}}{\bar{L}} \quad (3.8)$$

$$GK_3 = \frac{L_{max} - L_{min}}{\bar{L}} \quad (3.9)$$

3.4.2 Statistische Bewertungsmethode mit Lageparametern

Um unabhängig und robust gegenüber messtechnisch bedingten Ausreißern zu sein, werden auf Basis der zuvor vorgestellten Gütekriterien GK_1 bis GK_3 drei weitere Gütekriterien definiert. Die Gütekriterien GK_4 bis GK_6 verwenden anstelle des Mittelwertes den Median L_{Median} , statt des Maximums das 95% Quantil $L_{95\%Q}$ und statt des Minimums 5% das Quantil $L_{5\%Q}$.

$$GK_4 = \log \left(\frac{L_{95\%Q}}{L_{5\%Q}} \right) \quad (3.10)$$

$$GK_5 = \frac{L_{95\%Q} - L_{Median}}{L_{Median}} \quad (3.11)$$

$$GK_6 = \frac{L_{95\%Q} - L_{5\%Q}}{L_{Median}} \quad (3.12)$$

3.4.3 Statistische Bewertungsmethode mit Streuungsparametern

In der DIN 5035-8 wird mit der Formel zu g_3 ebenfalls ein Gütekriterium unter der Verwendung der Standardabweichung vorgestellt. Auf Basis der Standardabweichung σ_E und dem Mittelwert E der Beleuchtungsstärke einer Fläche ist nach Formel 3.14 folgendes Gütekriterium definiert [27]:

$$g_3 = \frac{\sigma_E}{E} \quad (3.13)$$

Für die Bewertung des Erscheinungsbilds von Signalleuchten wird die Beleuchtungsstärke E durch die Leuchtdichte L ersetzt (siehe Gleichung 3.14).

$$GK_7 = \frac{\sigma_L}{L} \quad (3.14)$$

3.4.4 Bewertungsmethode mit Gradienten

Kleinkes entwickelte ein Gütekriterium zur Bewertung der Homogenität der Scheinwerferlichtverteilung, das auf Gradienten basiert. Nach Kleinkes [54] ist die Kontrastempfindlichkeit mathematisch äquivalent zur Bewertung von Gradienten innerhalb einer Leuchtdichteverteilung durch die menschliche Wahrnehmung. Des Weiteren kann laut Kleinkes die generierte Gesamtempfindung einer inhomogenen Leuchtdichteverteilung mathematisch durch die Summe aller auftretenden Gradienten innerhalb eines Bewertungsfeldes beschrieben werden. Dies schließt ebenfalls Vergleiche zwischen Leuchtdichtemustern ein, die aus dem Kurz- oder Langzeitgedächtnis abgerufen werden können [54].

Zur Bestimmung der auf Basis der kumulierten Gradienten ermittelten Gütekennzahl führt Kleinkes mehrere Schritte durch, die im Folgenden kurz beschrieben werden. Zunächst werden von zu bewertender Scheinwerferlichtverteilung ortsauflösende Leuchtdichteaufnahmen gemacht. Um den durch die raue Straßenoberfläche begründeten Inhomogenitäten innerhalb der Leuchtdichteverteilung zu begegnen, verwendet Kleinkes einen 10x10 Pixel großen Mittelwertfilter. Zudem erfolgt eine Datenreduktion, um die Detektion von Leuchtdichteunterschieden zwischen benachbarten Pixeln zu vermeiden [54].

Damit eine Vergleichbarkeit zwischen Lichtverteilungen von unterschiedlichen Scheinwerfertechnologien gegeben ist, werden für die Ermittlung des Gütekriteriums zehn standardisierte Messregionen auf der Fahrbahn definiert. Die verschiedenen Adaptationsniveaus der Scheinwerferlichtverteilung werden im Rahmen der Bestimmung des Gütekriteriums berücksichtigt, indem eine Region mit Hilfe des maximalen Mittelwerts normiert wird. Der maximale Mittelwert wird aus den Mittelwerten der Region aller Lichtverteilungen ermittelt.

Nach den genannten Schritten wird der Gradient der reduzierten Leuchtdichteverteilung $L(x_i, y_i)$ nach der Differenzenmethode für eine Pixelgröße von 1 nach Gleichung 3.15 bestimmt.

Die Indizes i und j definieren die Zeilen und Spalten der Leuchtdichtematrix.

$$\text{grad } L(x_i, y_j) = \left(\frac{L(x_{i+1}, y_j) - L(x_{i-1}, y_j)}{2}, \frac{L(x_i, y_{j+1}) - L(x_i, y_{j-1})}{2} \right) \quad (3.15)$$

Durch die Bildung des Gradienten von Gleichung 3.15 entstehen zwei Matrizen $\text{grad} Lx(i, j)$ und $\text{grad} Ly(i, j)$, die die Leuchtdichtegradienten in x- und y-Richtung umfassen. Für die Bewertung der Homogenität erfolgt eine getrennte Bewertung in beide Richtungen, damit der Einfluss beider Richtungen unabhängig voneinander bewertet werden kann. Nach Kleinkes schlagen sich starke Inhomogenitäten durch große Zahlenwerte in den aufsummierten Gradientenmatrizen nieder. Homogene Lichtverteilungen sollten dagegen kleine Zahlenwerte aufweisen. Für jede der 10 Bewertungsregionen wird die Kennzahl K ermittelt, die je nach Bewertungszone (Vorfeld, Komfortzone) entweder aus der Summe der x-Gradienten (k_x) oder aus der Summe der x- und y-Gradienten ($k_x + k_y$) nach Gleichung 3.16 und 3.17 gebildet wird.

$$k_x = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n |\text{grad } Lx(i, j)| \quad (3.16)$$

$$k_y = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n |\text{grad } Ly(i, j)| \quad (3.17)$$

In den Gleichungen 3.18 und 3.19 werden die Kennzahlen $K(\text{Vorfeld})$ und $K(\text{Komfort})$ für das Vorfeld und die Komfortzone definiert.

$$K(\text{Vorfeld}) = k_x + k_y \quad (3.18)$$

$$K(\text{Komfortzone}) = k_x \quad (3.19)$$

Demzufolge ist Bewertung der Homogenität vom Abstand der Regionen zum Beobachter abhängig, da für die Komfortzone lediglich die Summe der Gradienten in x-Richtung und im Vorfeld sowohl die Summe der Gradienten in x-, als auch in y-Richtung berücksichtigt werden [54].

Mit dem zuvor beschriebenen Verfahren ist es Kleinkes gelungen, die Homogenität des Abblendlichts in Form einer Leuchtdichteverteilung objektiv bewerten zu können. Die Übertragbarkeit dieser Verfahren auf die Bewertung von Signalleuchten wird an dieser Stelle jedoch stark angezweifelt. Der Gradient der Leuchtdichteverteilung nimmt bei Signalleuchten ebenfalls einen großen Einfluss auf die Homogenitätsbewertung. Jedoch können durch die Aufsummierung der Gradienten nach Gleichung 3.16 und 3.17 nicht analoge Ergebnisse erzielt werden. Der Grund hierfür ist die große Variation der leuchtenden Flächen in ihren Formen, Abmessungen und ihrer Helligkeit je nach Leuchte. Anders als bei der Scheinwerferlichtverteilung ist die

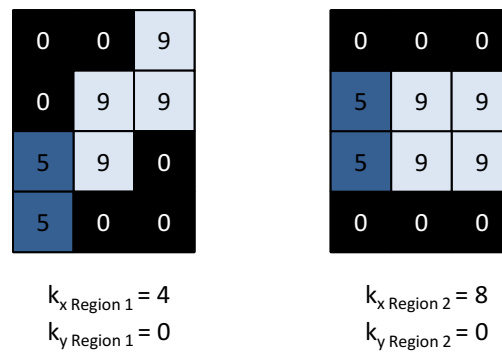


Abbildung 3.4: Auswirkung der Orientierung der leuchtenden Flächen auf die Bestimmung von Gradienten

zu bewertende Messregion nicht einheitlich, sondern unterscheidet sich in der Regel. Des Weiteren ist die Drehung der leuchtenden Flächen im Raum stets unterschiedlich und erschwert somit die Vergleichbarkeit der auf die x- und y-Richtung basierten Gradient-Kennzahlen. Die Drehung der leuchtenden Fläche im Raum ist durch zwei kleine Matrizen in Abbildung 3.4 veranschaulicht, welche 2x3 Pixel große leuchtende Flächen in waagerechter und gedrehter Position darstellen sollen.

Es zeigt sich, dass trotz desselben Leuchtdichtekontrasts unterschiedliche Gradientenwerte ermittelt werden. Für die Verwendung des Gradientenverfahrens sei zudem anzumerken, dass nicht bekannt ist, in welchem Verhältnis der Einfluss des Summeneindrucks der Gradienten zum Einfluss des Maximalgradienten steht. Aus den zuvor genannten Anmerkungen kann abschließend die Aussage getroffen werden, dass das von Kleinkes vorgestellte Verfahren nicht für die Bewertung der Homogenität von Signalleuchten geeignet ist und daher im weiteren Verlauf der Arbeit nicht weiter berücksichtigt wird.

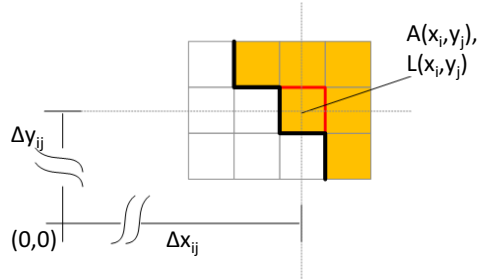
3.4.5 Bewertungsmethode auf der Basis von Schwerpunkten

Im Rahmen dieser Arbeit wurde eine neue Methode zur Bewertung der Homogenität entwickelt. Der Ansatz besteht darin, dass bei homogen leuchtenden Flächen der photometrische und der geometrische Schwerpunkt (S_p , S_g) denselben Ursprung besitzen. Andernfalls gibt es zwischen dem geometrischen und photometrischen Schwerpunkt einen Abstand, der zur Bewertung der Inhomogenität herangezogen werden kann. So kann mit dem vorgestellten Kriterium neben der Ausprägung einer Inhomogenität durch die geometrische Ausdehnung und den Helligkeitsunterschied ebenfalls die Position einer Inhomogenität berücksichtigt werden.

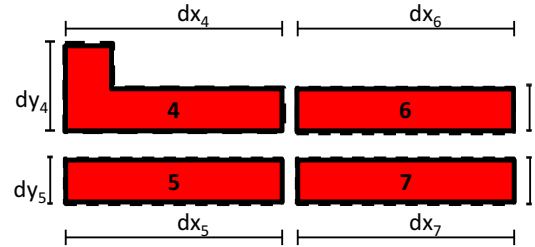
Der geometrische und photometrische Schwerpunkt der jeweiligen Messregion wird unter Zuhilfenahme der Ortskoordinaten Δx_{ij} , Δy_{ij} sowie durch die Leuchtdichte $L(x_i, y_j)$ der einzelnen Pixel der Messregion bestimmt (siehe Abbildung 3.5). Im Zuge der Berechnung der

verschiedenen Schwerpunkte sind alle Pixel einer leuchtenden Fläche gemäß Gleichung 3.20 definiert.

$$A(x_i, y_j) = 1 \quad (3.20)$$



(a) Abbildung zur Definition von Messregionen auf Pixelbasis



(b) Abbildung zur Definition von Messregionen am Beispiel eines Schlusslichts

Abbildung 3.5: Messregionen zur Bestimmung der Schwerpunkte S_{pn} , S_{gn} einer leuchtenden Fläche

Ausgehend vom Ursprung des Bildkoordinatensystems werden die xy-Koordinaten des geometrischen Schwerpunkts nach den Gleichungen 3.21 und 3.22 wie folgt bestimmt:

$$S_{gn}(x) = \frac{\sum_i \sum_j \Delta x_{ij} \cdot A(x_i, y_j)}{\sum_i \sum_j A(x_i, y_j)} \quad (3.21)$$

$$S_{gn}(y) = \frac{\sum_i \sum_j \Delta y_{ij} \cdot A(x_i, y_j)}{\sum_i \sum_j A(x_i, y_j)} \quad (3.22)$$

Die Berechnung des photometrischen Schwerpunkts erfolgt analog zum geometrischen Schwerpunkt unter Einbeziehung der Leuchtdichte des jeweiligen Pixels.

$$S_{pn}(x) = \frac{\sum_i \sum_j \Delta x_{ij} \cdot A(x_i, y_j) \cdot L(x_i, y_j)}{\sum_i \sum_j A(x_i, y_j) \cdot L(x_i, y_j)} \quad (3.23)$$

$$S_{pn}(y) = \frac{\sum_i \sum_j \Delta y_{ij} \cdot A(x_i, y_j) \cdot L(x_i, y_j)}{\sum_i \sum_j A(x_i, y_j) \cdot L(x_i, y_j)} \quad (3.24)$$

Anschließend erfolgt eine getrennte Bestimmung der absoluten Koordinatenstände dS_{xn} und dS_{yn} in x- sowie in y-Richtung der jeweiligen Schwerpunkte nach den Gleichungen 3.25 und 3.26:

$$dS_{xn} = S_{pn}(x) - S_{gn}(x) \quad (3.25)$$

$$dS_{yn} = S_{pn}(y) - S_{gn}(y) \quad (3.26)$$

Da Größe und Form der Lichtaustrittsflächen von Lichtfunktionen auf Grund der unterschiedlichen Designs in der Regel verschieden sind, werden die zuvor genannten Abstände ins Verhältnis zur Ausdehnung dx_n und dy_n der zu bewertenden Region gesetzt (siehe Abbildung 3.5 (b)). So es ist möglich, dass das Gütekriterium auf der Basis der Schwerpunkte auf jegliche Geometrien vergleichbar anwendbar ist. Die Homogenität von leuchtenden Flächen wird somit durch das Gütekriterium GK_8 wie folgt beschrieben:

$$GK_8 = \sqrt{\left(\frac{dS_{xn}}{dx_n}\right)^2 + \left(\frac{dS_{yn}}{dy_n}\right)^2} \quad (3.27)$$

Abschließend wird darauf hingewiesen, dass symmetrische Inhomogenitäten um den Schwerpunkt dieses Kriterium nicht beeinflussen.

3.4.6 Bewertungsmethode auf der Basis von Kontrastschwellenmodellen

In Kapitel 2.4.4 wurden verschiedene Kontrastsichtbarkeitsmodelle beschrieben. Von diesen Modellen werden potenzielle Gütekriterien zur Bewertung der Homogenität von Signalleuchten abgeleitet. Gemäß der Formel zur Bestimmung des Visibility Levels VL nach Gleichung 2.30 erfolgt für jedes Pixel einer ortsauflösenden Leuchtdichtemessung die Berechnung in Anlehnung an Formel 2.20 für das Kontrastmodell von Adrian und an Formel 2.23 für das von Kokoschka sowie an der Formel 2.29 zum lokalen Schwellenkontrast. Mit Hilfe dieses Visibility Levels kann somit der Kontrastunterschied zwischen zwei benachbarten Pixeln innerhalb einer leuchtenden Messregion bewertet werden, der von einem Beobachter unter Voraussetzung der Sehleistung wahrgenommen werden kann.

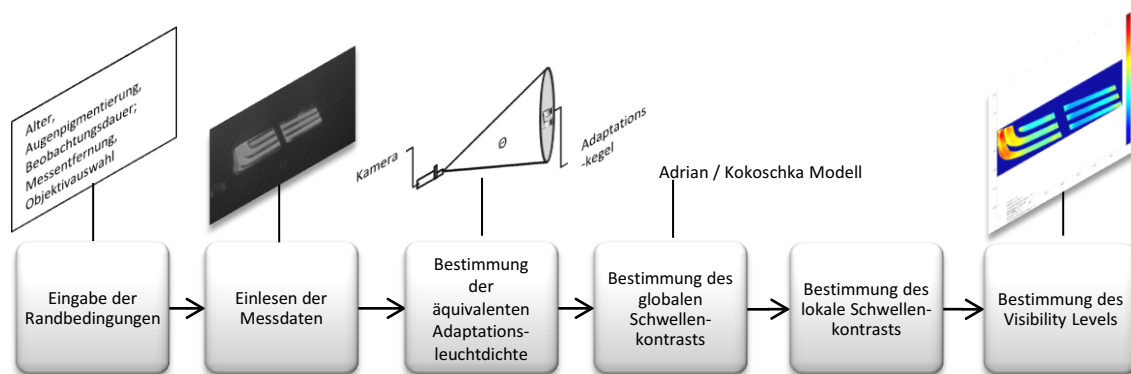


Abbildung 3.6: Prozess zur Bestimmung des Visibility Levels

Der darauf aufbauende Prozess ist in Abbildung 3.6 veranschaulicht. Dieser umfasst zunächst die Verarbeitung von manuell eingegebenen Benutzerdaten sowie das Einlesen der Bild- und Regionsdaten der jeweiligen Messungen. Die genannten Benutzerdaten enthalten Informationen

zu den Randbedingungen aus der photometrischen Vermessung (Objektwahl, Entfernung zwischen Kamera und Testobjekt) sowie aus der Probandenstudie (Alter, Pigmentierung der Iris, Beobachtungsdauer).

Es wird zur Berechnung des Visibility Levels stets von dem für die Homogenitätsbewertung ungünstigsten Fall¹ ausgegangen. Aus der Messentfernung von vier Metern und der Auswahl eines 50 mm Objektivs wird im nachfolgenden Prozess der Zusammenhang zwischen der Pixelgröße² und der realen geometrischen Größe hergestellt. So ist es möglich, die Dimension einer leuchtenden Fläche zu bestimmen. Gemäß dem Nyquist-Theorem werden mindestens zwei Pixel benötigt, um ein Objekt eindeutig von seiner Umgebung mit einer Kamera abgrenzen zu können [77]. Der zum Menschen äquivalente Visus der Kamera beträgt daher 1,15 Bogenminuten. Auf eine weitere Unterabtastung sowie auf eine Mittelwertfilterung wird verzichtet, da sich der äquivalente Visus der Kamera und der Kontrast (Kantenverwischung) dadurch weiter reduziert und damit höhere Abweichungen von dem menschlichen Visus unter den in Abschnitt 2.4.2 genannten Adaptationsleuchtdichten erzielt werden.

Im nächsten Schritt wird ausgehend von den eingelesenen Daten die äquivalente Adaptationsleuchtdichte aus der Summe der Adaptationsleuchtdichte L_a und der Schleierleuchtdichte L_{seq} nach Formel 2.6 bestimmt. Die äquivalente Adaptationsleuchtdichte, die Leuchtdichte eines Pixels innerhalb einer Messregion sowie die genannten Rahmenbedingungen werden im nächsten Schritt verwendet, um die globale Kontrastschwelle zu berechnen.

Im nachfolgenden Prozessschritt wird für jedes einzelne Pixel einer Messregion die lokale Kontrastschwelle auf Basis der globalen Kontrastschwelle sowie der Leuchtdichten des eigenen Pixels und des unmittelbar benachbarten Pixels nach Gleichung 2.29 ermittelt.

Für spätere Untersuchungen werden die Ergebnisse, wie in Abbildung 3.6 angedeutet, visualisiert. Es ist dabei zu beachten, dass jedes Pixel einer Aufnahme auf den Wert null gesetzt wird, sobald sich das Pixel nicht innerhalb der definierten Messregion befindet oder ein Visibility Level kleiner eins besitzt.

Für die Homogenitätsbewertung von flächigen Lichtfunktionen wird hier zunächst die Annahme getroffen, dass die Homogenität mit Hilfe des Verhältnisses aus der Anzahl der sichtbaren Pixel $n_{Pixel_{sichtbar}}$ zu der Gesamtanzahl einer Messregion $n_{Pixel_{Messregion}}$ beschrieben werden kann. Die Anzahl der sichtbaren Pixel $n_{Pixel_{sichtbar}}$ ist so definiert, dass die Summe aus allen Pixeln einer Messregion nach Gleichung 3.28 gebildet wird.

$$n_{Pixel_{sichtbar}} = \sum_{k=0}^{n_{Pixel_{Messregion}}} k \quad (3.28)$$

$$\left| VL_{Pixel}(L_a, C_{th_{global}}, \Delta L_{Pixel}(x, y)) \right| > 1$$

¹Alter = 25, Pigmentierung = 1, Beobachtungsdauer = 2 Sekunden

²Höhe P_H und Breite P_B je Pixel = 2,29 Bogenminuten

Tabelle 3.1: Verwendete Randbedingungen zur Bestimmung des Visibility Levels

Gütekriterium	Adaptationsleuchtdichte	Kontrastschwellenmodell
	L_a	$C_{th_{global}}$
GK_9	Mittlere Leuchtdichte der Messregion	Adrian nach Formel 2.20
GK_{10}	Leuchtdichte aus Adaptationskegel mit 6° Öffnungswinkel	Adrian nach Formel 2.20
GK_{11}	Mittlere Leuchtdichte der Messregion	Kokoschka nach Formel 2.23
GK_{12}	Leuchtdichte aus Adaptationskegel mit 6° Öffnungswinkel	Kokoschka nach Formel 2.23

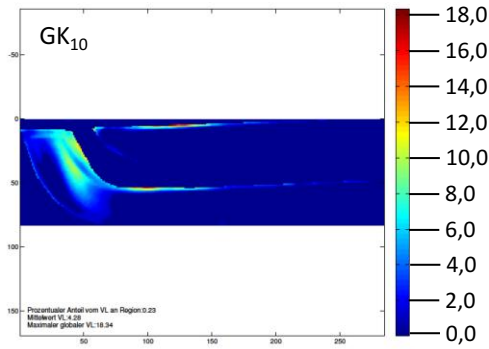
Da für die Bestimmung des Schwellenkontrasts zwei Modelle existieren und zudem die Adaptationsleuchtdichte einen großen Einfluss auf die Berechnung nimmt, werden insgesamt vier Varianten des Gütekriteriums nach Formel 3.29 untersucht.

$$GK_{9-12} = \frac{n_{Pixel_{sichtbar}}}{n_{Pixel_{Messregion}}} \quad (3.29)$$

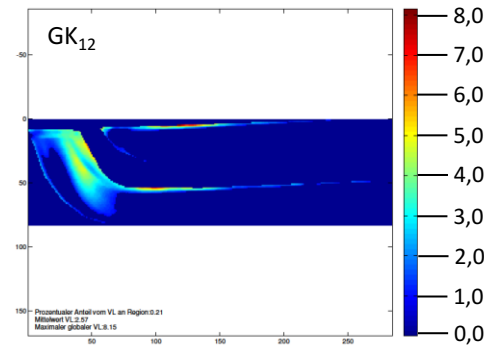
In Tabelle 3.1 sind die verschiedenen Randbedingungen zur Bestimmung der jeweiligen Homogenitätskennzahl aufgeführt.

Die Abbildungen 3.7(a), (b) und 3.8(a), (b) zeigen beispielhaft die Ergebnisse des berechneten Visibility Levels am Beispiel einer BMW 3er Heckleuchte aus dem Jahre 2010 nach den Vorgaben aus Tabelle 3.1. Das Erscheinungsbild dieser Heckleuchte ist durch zwei Einkoppelstellen auf der fahrzeugmittigen Seite gezeichnet (siehe Leuchtdichtebild in Abbildung 2.13).

Es ist ersichtlich, dass alle vier Abbildungen unterschiedliche Ergebnisse im Hinblick auf den maximalen Wert und die Verteilung des Visibility Levels aufweisen. Bei der Betrachtung der Ergebnisse der Gütekriterien GK_{10} und GK_{12} beider Kontrastschwellenmodelle unter Verwendung eines Adaptationskegels mit 6° Öffnungswinkel zur Bestimmung der Adaptationsleuchtdichte fällt auf, dass in beiden Fällen keine hellen Einkoppelstellen auf der rechten Seite der Lichtleiter durch das Visibility Level dargestellt werden. Die in der Realität als zu dunkel bewerteten Teilflächen werden mit dem Visibility Level exakt markiert. Ansonsten ist die Darstellung der Lichtleiter für beide Kontrastschwellenmodelle bis auf die Skalierung des berechneten Visibility Levels nahezu identisch (siehe Abbildung 3.7(a) und (b)). Die berechneten Gütekriterien GK_{10} und GK_{12} sind mit den Zahlenwerten 0,23 und 0,21 ebenfalls sehr ähnlich.



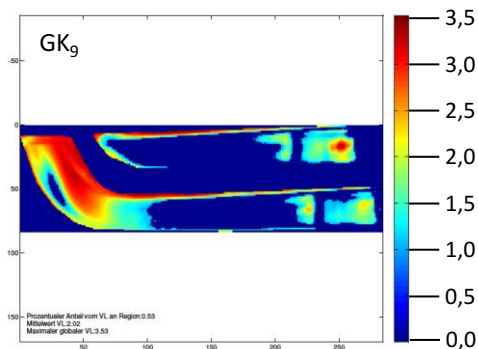
(a) Berechnetes Visibility Level auf Basis des Adrian-Modells mit $L_a = 6^\circ$ -Adaptationskegel



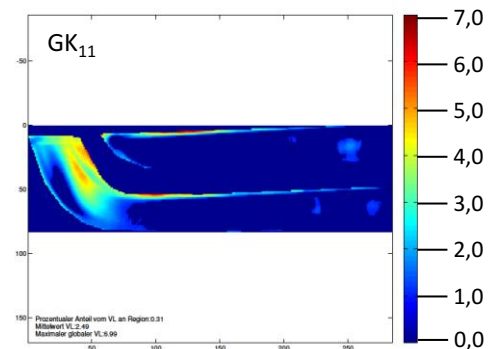
(b) Berechnetes Visibility Level auf Basis des Kokoschka-Modells mit $L_a = 6^\circ$ -Adaptationskegel

Abbildung 3.7: Berechnetes Visibility Level auf Basis des Adrian-Modells und des Kokoschka-Modells am Beispiel der BMW 3er HKL Baujahr 2010 - 1

Wird die mittlere Leuchtdichte der Messregionen als Adaptationsleuchtdichte verwendet, verändert sich die Verteilung des Visibility Levels deutlich (siehe Abbildung 3.8). Neben den zuvor erkannten, zu dunklen Teilflächen werden ebenfalls die zu hellen Teilflächen an der rechten Seite der Lichtleiter detektiert. Die Detektion der zu hellen Einkoppelstellen ist bei der Verwendung des Schwellenkontrastmodells von Kokoschka weniger stark ausgeprägt als beim Adrian Modell. Dies zeigt sich ebenfalls in dem Ergebnis der Kennzahl des Gütekriteriums ($GK_9 = 0,53$ und $GK_{11} = 0,31$).



(a) Berechnetes Visibility Level auf Basis des Adrian-Modells mit $L_a = \bar{L}_{Region}$



(b) Berechnetes Visibility Level auf Basis des Kokoschka-Modells mit $L_a = \bar{L}_{Region}$

Abbildung 3.8: Berechnetes Visibility Level auf Basis des Adrian-Modells und des Kokoschka-Modells am Beispiel der BMW 3er HKL Baujahr 2010 - 2

Grundsätzlich zeigen die vorgestellten Berechnungen des Visibility Levels auf den ersten Blick, dass diese Modelle zur Bewertung der Homogenität herangezogen werden können.

Ob die nach den Kontrastmodellen ermittelten Gütekriterien GK_{9-12} mit der subjektiven Homogenitätsbewertung korrelieren, gilt es im Weiteren zu überprüfen.

4 Untersuchungen zur farblichen Homogenität von Signalfunktionen

4.1 Untersuchungen am Positionslicht-Warmerscheinungsbildsimulator

4.1.1 Ziel der Untersuchungen

Für die Untersuchungen zu farblichen Inhomogenitäten von Signalleuchten soll zuerst ein Versuchsaufbau entwickelt werden, mit dem Farberscheinungen in einem realen Scheinwerferumfeld mit Lichtleitringen realitätsgetreu und reproduktiv im ECE-Weißbereich nachgestellt werden. Ein weiteres Ziel der nachfolgenden Probandenuntersuchungen ist es, geeignete Gütekriterien und Grenzwerte in Abhängigkeit des Farborts, der Objekt- und Umfeldhelligkeit für die Bewertung der farblichen Homogenität eines Scheinwerfers, insbesondere bei der weißen Positionslichtfunktion, zu ermitteln. Abgeleitet aus den spezifischen Grenzwerten der jeweiligen Untersuchungen soll ein Modell der Farbbewertung in einem aufgespannten Bereich in der CIE xy-Farbtabelle ($x=0,28$ bis $0,35$ und $y=0,29$ bis $0,36$) ermittelt werden. So ist es nach einer nachfolgenden Validierung möglich, LED-Binnings hinsichtlich ihrer Eignung in der automobilen Kraftfahrzeugbeleuchtung zu bewerten und eigene Binnings für die beschriebene Anwendung zu definieren.

4.1.2 Versuchsaufbau

Abbildung 4.1 stellt schematisch den Aufbau des Positionslicht-Warmerscheinungsbildsimulators (PWS) dar. Der Simulator bietet die Möglichkeit, verschiedenfarbige Positionslichter in einem Scheinwerfer mit Lichtleitern realitätsgetreu zu visualisieren. Die Komponenten sind zwei 3-Chip D-ILA Projektoren¹ mit zwei Linsen sowie zwei weitere Lichtleiter zur Einkoppelung des Lichts in einen BMW 5er Scheinwerfer mit Tagfahrlichtringen.

Die Ansteuerung der Projektoren erfolgt unabhängig mit Hilfe von zwei Ansteuerungscomputern. Die Computer steuern mit Hilfe von uni-farbigen Powerpoint-Folien die Farbe jedes Rings. Dabei entspricht jeder RGB-Wert² der Hintergrundeinstellung einer PowerPointfolie einem

¹Direct Driven Image Light Amplifier

²R = Rot, G = Grün, B = Blau

Helligkeitswert und einem Farbort des Gesamtsystems. Die RGB-Farben der PowerPointfolien werden mit dem in Anhang C.3 beschriebenen Farbmischalgorithmus generiert. [41].

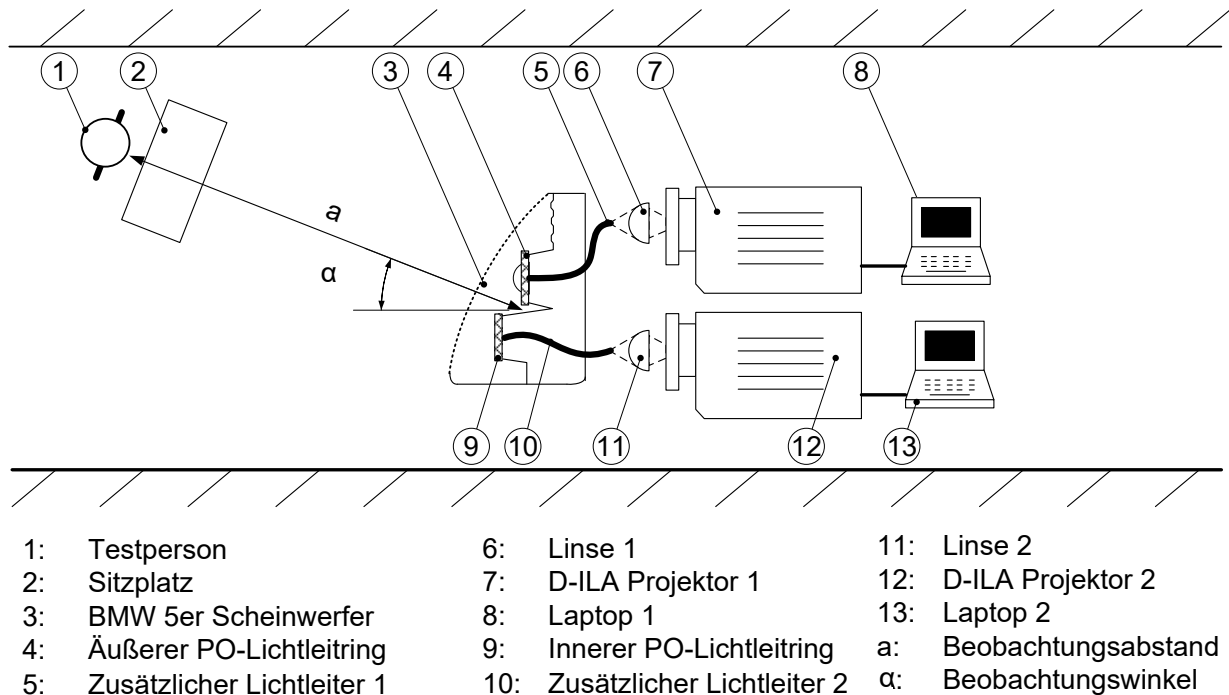
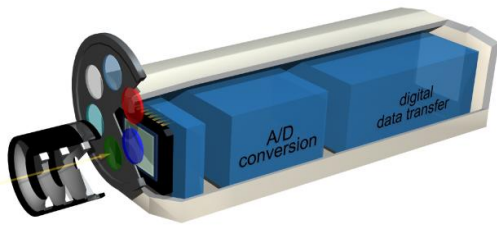


Abbildung 4.1: Schematischer Aufbau des Positionslicht-Warmerscheinungsbildsimulators

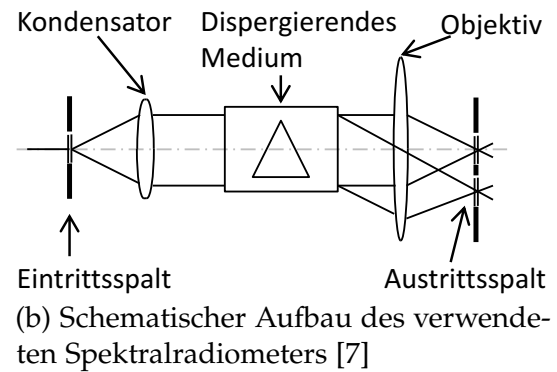
Die bei diesem Versuchsaufbau verwendeten Scheinwerfer entsprechen geometrisch der Serie, wobei für die Versuche die Akzentleuchte aus Gründen einer eindeutigen Farbunterschiedsbewertung der Ringe deaktiviert wurde. Die Akzentleuchte ist eine ebenfalls weiß leuchtende Fläche, die geometrisch oberhalb der beiden Ringe angeordnet ist (siehe Abbildung 4.19). Die leuchtende Fläche des fahrzeugäußeren Rings beträgt 24 cm^2 und die des fahrzeuginneren Rings 18 cm^2 . Mit diesen Lichtleitringen werden sowohl die Tagfahrlicht- als auch die Positionslichtfunktion realisiert. Mit dem hier vorgestellten Simulator ist das Helligkeitsniveau einer Positionslichtfunktion erreichbar. So kann das typische Nachterscheinungsbild des Fahrzeugs mit einer Vielzahl von Farbvalenzen an beiden Ringen unabhängig voneinander und mit einer hohen Wiederholgenauigkeit erzeugt werden.

4.1.3 Erfassung der photometrischen Systemeigenschaften

Für die Entwicklung der Steueralgorithmen und für die Kalibrierung des Gesamtsystems mussten die farbmetrischen und lichttechnischen Eigenschaften des Positionslichtsimulators ermittelt werden. Die Analyse der farbmetrischen und lichttechnischen Eigenschaften des Komplettsystems wurde mit Hilfe einer ortsauflösenden Farb- und Leuchtdichtekamera (LMK 98-3-Colour) und mit einem Spektrometer (Specbos1201) durchgeführt (siehe Abbildung 4.2).



(a) Schematischer Aufbau der verwendeten Leuchtdichtekamera [61]



(b) Schematischer Aufbau des verwendeten Spektralradiometers [7]

Abbildung 4.2: Schematische Darstellung der verwendeten Messtechnik

Die verwendete Leuchtdichtekamera LMK Color 98-3 ermöglicht eine ortsauflösende Helligkeits- und Farbmessung und basiert auf CCD-Sensoren. Mit Hilfe von Glas- und Interferenzfiltern erfolgt eine $V_2(\lambda)$ -Anpassung. Eine örtlich unterschiedliche Sensorempfindlichkeit wird mit einer proprietären Software reduziert, die für die Messung und Verarbeitung der Kamerarohdaten benötigt wird [7], [61]. Die Leuchtdichtekamera besitzt für die Normlichtart A einen messtechnischen Fehler für die Leuchtdichteabweichung von 3% und für die Farbwertanteilabweichung x, y von $< 0,0020$ (siehe Datenblatt in Anhang A.1).

Das Specbos1201 ist ein Spektrometer, mit dem eine integrierende, spektrale Lichtmessung in einem Sichtfeld von $1,8^\circ$ durchgeführt werden kann. Das zu vermessende Licht wird mit einem dispergierenden Element, welches in dieser technischen Lösung ein optisches Gitter ist, in seine spektralen Anteile aufgespaltet. In der Abbildungsebene des Messgeräts befindet sich ein Fotoarray von 1024 Pixeln, mit dem das Spektrum fotoelektrisch aufgezeichnet wird [7]. Mit Hilfe eines Lasers ist die Möglichkeit gegeben, ein Messfeld exakt zu positionieren. Das Specbos besitzt für die Normlichtart A einen messtechnischen Fehler für die Leuchtdichteabweichung von 2% und für die Farbwertanteilabweichung x, y von $< 0,0020$ (siehe Datenblatt in Anhang A.1).

Zur Ermittlung der Helligkeiten der Lichtleitringe erfolgten Leuchtdichtemessungen mit einem 50 mm Objektiv in einer Entfernung von 2,7 m und einem Beobachtungswinkel von horizontal 30° und vertikal 0° . Mit dem 50 mm Objektiv werden Werte in einem Winkelbereich von horizontal 10° und vertikal $7,56^\circ$ erfasst, woraus eine Auflösung von 2,29 Bogenminuten je Pixel resultiert. Das vermessene Objektfeld wird mit der Kameraauflösung von 1375 Pixeln horizontal und 1024 Pixeln vertikal diskretisiert.

Abbildung 4.3 zeigt die Leuchtdichtemessung beider Lichtleitringe nach einer Betriebszeit von drei Stunden mit einer weißen Farbvalenz (Rot-, Grün- und Blau-Wert = 255) als Ansteuerung. Zur Bestimmung der mittleren Leuchtdichte wurden zwei Messregionen definiert, die den leuchtenden Flächen der jeweiligen Tagfahrlichtringe entsprechen.

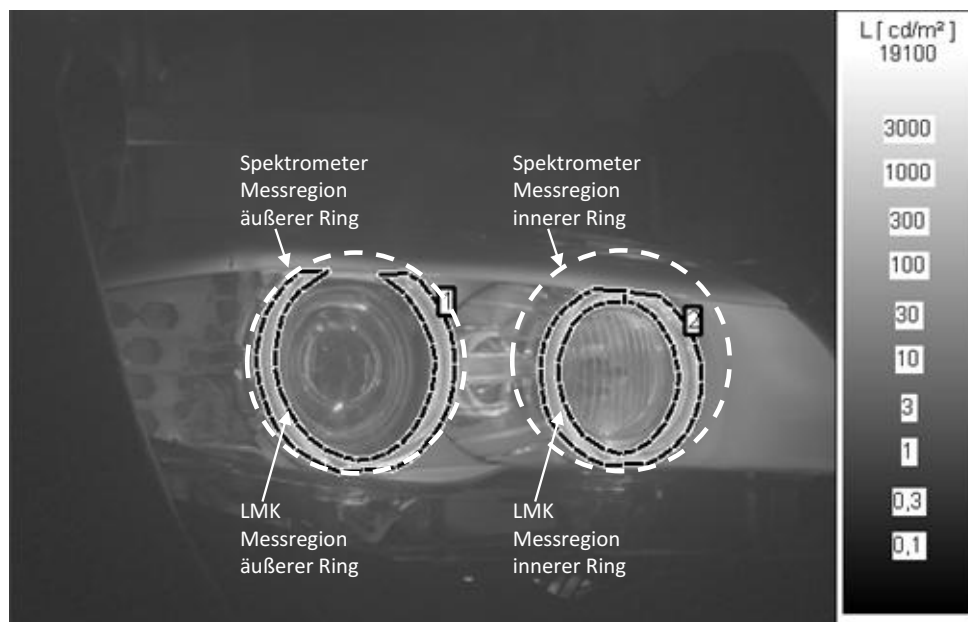


Abbildung 4.3: Leuchtdichteverteilung des Warmerscheinungsbildsimulators mit einer R=255, B=255, G=255 Einstellung in einem Betrachtungswinkel von 30° nach 180 min.

Obwohl die verwendete LMK-Color 98-3 die Möglichkeit einer ortsauflösenden Farbmessung bietet, erfolgte die Erfassung der farbmimetrischen Systemeigenschaften ausschließlich mit dem zuvor genannten Spektrometer. Der Grund dafür ist, dass bei einer Farbmessung mit der LMK-Color 98-3 durch die Kombination aus der hohen Auflösung der Kamera und dem Messobjekt Effekte auftreten können, die die Messergebnisse stark verfälschen. Bei einer ortsauflösenden Vermessung von Lichtleitern mit einer rückseitigen Prismenstruktur entstehen im Messbild scharfe Kanten, an denen es zu einem Farbversatz kommt (siehe Abbildung 4.4).

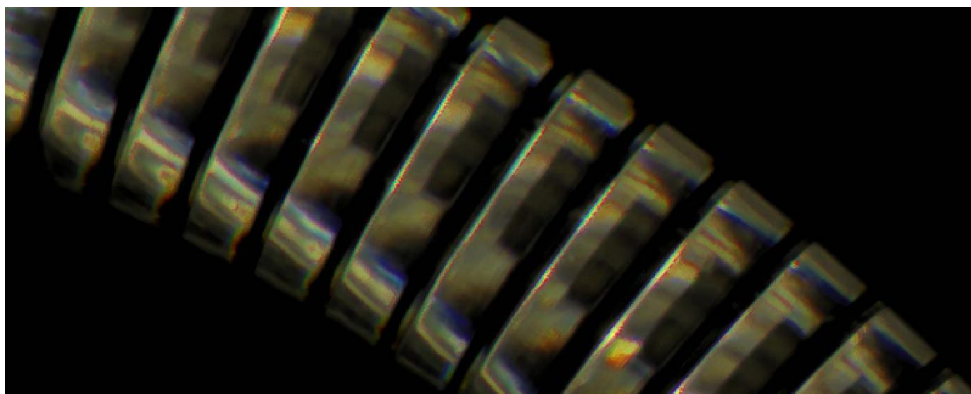


Abbildung 4.4: Stark vergrößerte ortsauflösende Farbaufnahme eines Lichtleiters

Der Versatz ist einerseits durch die geringfügigen, unterschiedlichen optischen Dicken der in der Kamera eingesetzten Filter und andererseits durch die nicht vollständig senkrecht zur optischen Achse eingepasste Einbaulage begründet. Des Weiteren hat die Keiligkeit der Filter

einen Einfluss. Auf Grund der genannten Randbedingungen entsteht ein Bildversatz, der von der Auswertungssoftware insbesondere entlang von Kanten nicht vollständig korrigiert werden kann. Erfolgt eine Farbauswertung über eine solche hochaufgelöste Region, entstehen somit falsche Farbwertanteile. Dies führt dazu, dass mit den verwendeten Farbmischalgorithmen keine Einstellungsparameter für ein farbgleiches Erscheinungsbild bestimmt werden können. Zur Überprüfung dieser Messunsicherheit wurde ein Lichtleitring mit unterschiedlichen LED-Lichtquellen sowohl ortsauflösend mit der LMK-Color als auch integral mit dem Specbos und einem Farbmesskopf mit einer Partialfilterung vermessen. Hierzu sind in Abbildung 4.5 die Messergebnisse und die Herstellerangabe für die Farborte der LEDs gegenübergestellt.

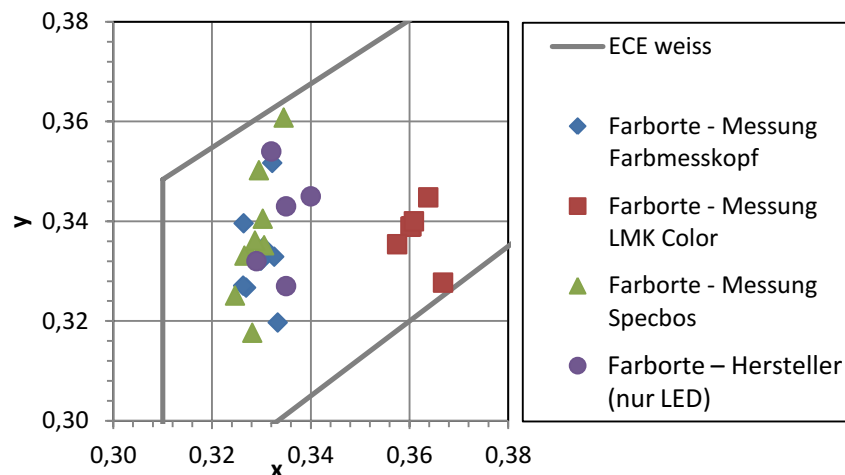


Abbildung 4.5: Gegenüberstellung der Messergebnisse zur Farbigkeit von Lichtleitringen von verschiedenen Messgeräten

Wie in Abbildung 4.5 gezeigt, besitzen alle gemessenen Farborte der LMK-Color im Gegensatz zu den anderen verwendeten Messgeräten sowie den herstellerseitigen Farbortangaben der LEDs eine Farbverschiebung in der CIE xy-Farbtabelle zu positiven x-Farbwertanteilen um den Wert $x=0,04$. Dieser Versatz entspricht einer Verschiebung zur gelblichen bzw. rötlichen Farbvalenz. Des Weiteren zeigt Abbildung 4.5 bei der LMK-Color Messung im Vergleich zu den anderen Messungen eine geringere Aufspreizung der Farborte in die y-Farbwertanteile.

Trotz des Nachteils einer integralen Messung wurde bei der farbmtrischen Analyse auf Grund der höheren Genauigkeit das Spektrometer eingesetzt. Im Rahmen der Lichtleitringvermessung wurde das Spektrometer in einer Entfernung von 2,7 m und einem Beobachtungswinkel von horizontal 30° und vertikal 0° positioniert, so dass mit der Apertur des Messgeräts ($1,8^\circ$) vollständig die Farbvalenz der größeren der beiden Tagfahrlichtringflächen vermessen werden konnte. Die Größe der Messregionen ist für beide Ringe gleich (siehe Abbildung 4.3). Der Mittelpunkt der Messregion entspricht dem geometrischen Mittelpunkt des äußeren sowie des inneren Rings. Beide Messregionen beinhalten jeweils die leuchtende Fläche des äußeren und des inneren Rings, wobei die zuletzt genannte Messregion zusätzlich angrenzende leuchtende Flächen erfasst.

4.1.4 Bewertung der photometrischen Systemeigenschaften

In vorangegangenen Untersuchungen konnte festgestellt werden, dass die Stabilität des Gesamtsystems nach einer Betriebszeit von einer Stunde erreicht wird (siehe Anhang C.1). Dies wurde im Weiteren sowohl bei der Versuchsdurchführung als auch bei der Kalibrierung des Systems stets berücksichtigt.

Abbildung 4.6 zeigt die Änderung der Farbvalenzen der Ringe in Abhängigkeit der unifarbigen Powerpointfolien³. Sowohl beim äußeren als auch beim inneren Ring zeigt sich eine deutliche Abhängigkeit zwischen den Farborten und der RGB-Einstellung. Zudem unterscheiden sich die Farborte der Primärfarben des äußeren und inneren Rings, da die Lichteinkoppelung in die Ringe auf Grund des Versuchsaufbaus nicht vollkommen identisch ist und sich die Extinktion der Lichtleiter auf Grund der unterschiedlichen Geometrie unterscheidet (siehe Kapitel 2.3.1.1). Die Richtung der Abweichung beim Dimmen der Farbvalenz bleibt jedoch gleich.

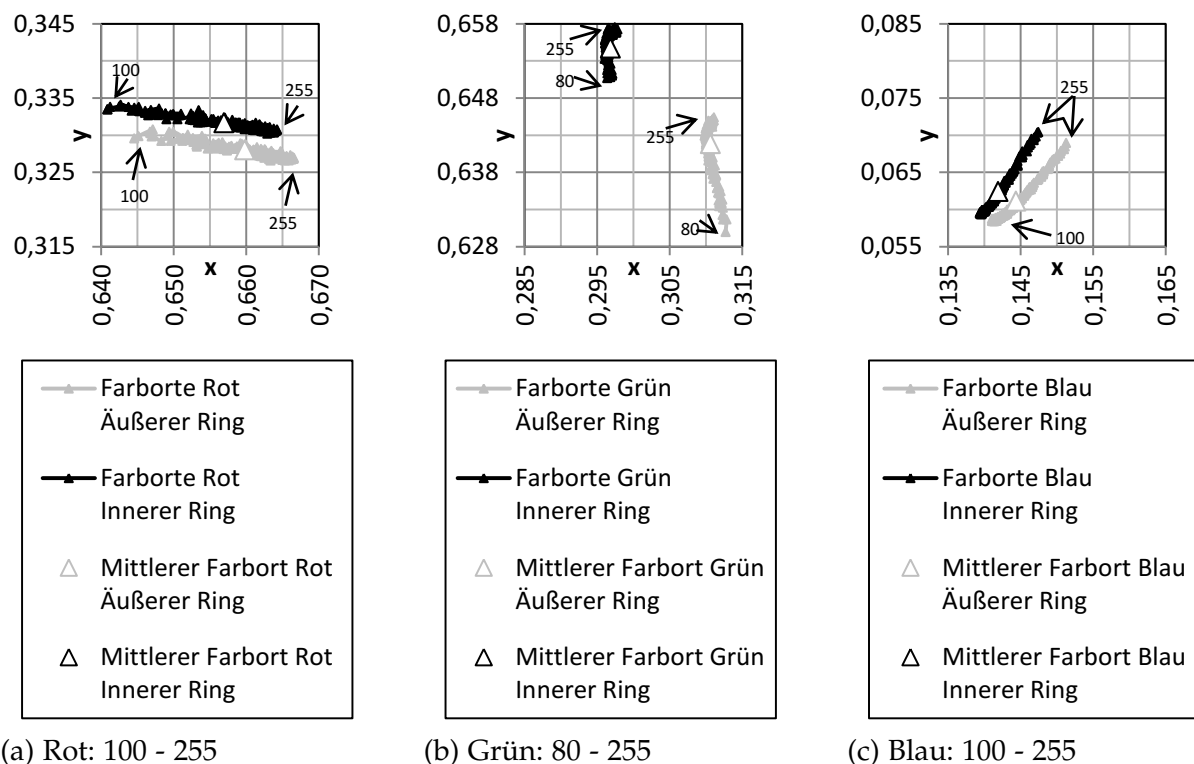
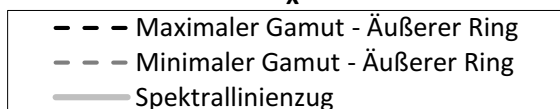
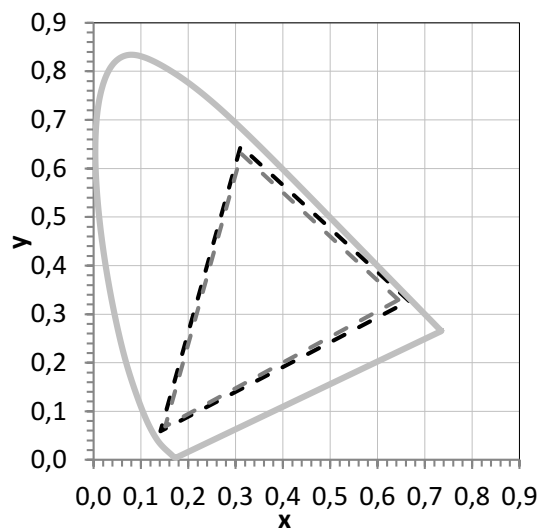


Abbildung 4.6: Farbortänderung in Abhängigkeit der unifarbigen Ansteuerung

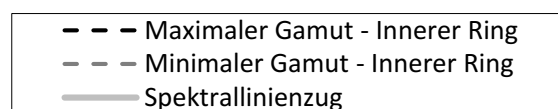
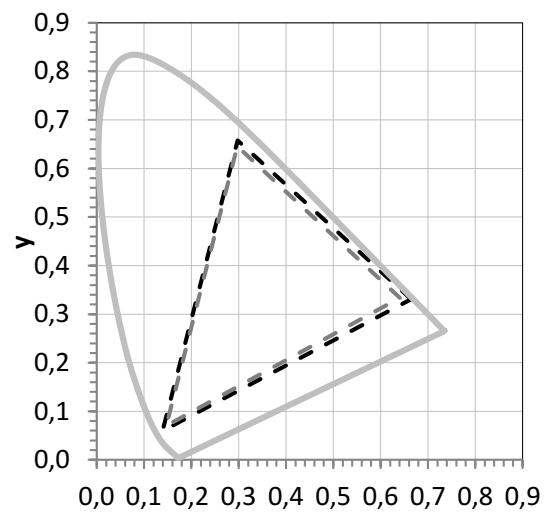
Für die unterschiedlichen RGB-Einstellungen ergeben sich somit unterschiedliche Farbräume. Abbildung 4.7 verdeutlicht diesen Unterschied durch den minimalen und maximalen Farbraum des inneren und äußeren Positionslichttrings in der CIE xy-Farbtabelle. Es zeigt sich, dass mit dem

³R: 0-255; B: 0-255; G: 0-255

System der gesamte Farbraum für die Farbe Weiß gemäß den ECE-Richtlinien generiert werden kann.



(a) Gamut des äußeren Rings



(b) Gamut des inneren Rings

Abbildung 4.7: Gamut beider Projektionssysteme inklusive des optischen Systems in der CIE xy-Farbtabelle

Abbildung 4.8 zeigt die mittleren Leuchtdichten der leuchtenden Fläche des äußeren und inneren Rings in Abhängigkeit der RGB-Einstellungen.

Mit den vorab ermittelten Messdaten können mit Hilfe des Ansteuerungsalgorithmus separat für jeden Positionslichtring die gewünschten Farbwerte bei einer gleichbleibenden Leuchtdichte und einer geringen Abweichung zum Sollfarbwerte generiert werden (siehe Anhang C.3 für Beschreibung des Ansteuerungsalgorithmus und siehe Anhang C.4 für die Abweichungsanalyse).

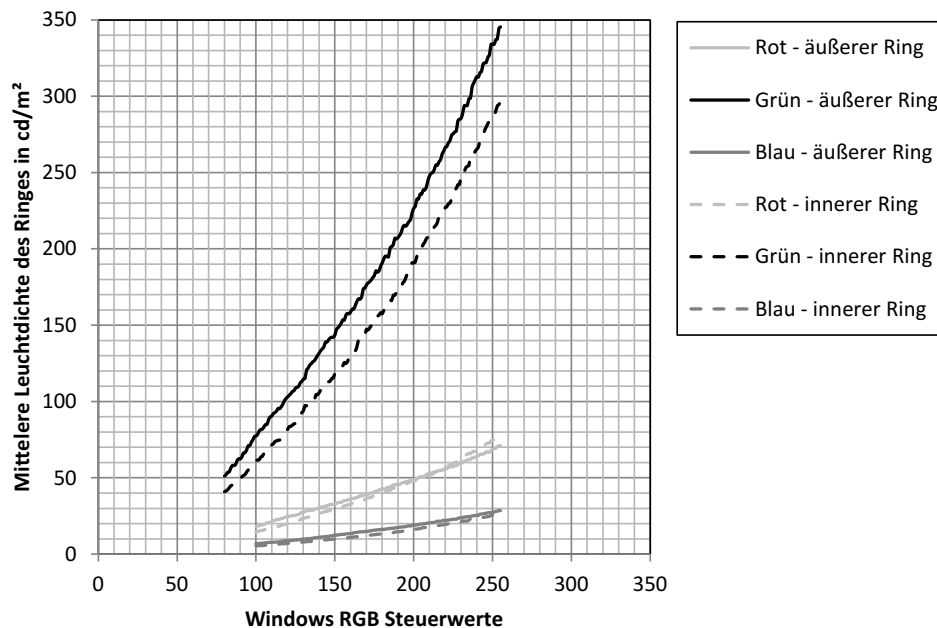


Abbildung 4.8: Mittlere Leuchtdichte der Primärfarben des äußeren und inneren Rings

4.1.5 Versuchsprotokoll und -durchführung

Mit Hilfe der Positionslichtsimulation wurden über 38.000 Probandenergebnisse zur Empfindung von Farbunterschieden zwischen Lichtleitringen in einem realen Scheinwerferumfeld bei einer konstanten Helligkeit ermittelt. Dazu erfolgten 14 Teilversuche mit insgesamt 211 Probanden.

An den Untersuchungen haben Probanden verschiedenen Alters und Geschlechts teilgenommen. Eine Kurz- und Weitsichtigkeit sowie eine Hornhautverkrümmung werden im Rahmen dieser Untersuchungen als unkritisch angesehen und stellen im Gegensatz zu einer Farbfehlsichtigkeit kein Ausschlusskriterium für die Befragung dar. Der Proband wird bei einer der genannten Fehlsichtigkeiten gebeten, eine Brille bzw. Kontaktlinsen zu verwenden, um diese auszugleichen. Der Teilnehmerkreis der Studien besteht hauptsächlich aus Probanden, die bei der BMW Group in Abteilungen ohne lichttechnischen Hintergrund tätig sind. Es wird davon ausgegangen, dass die Probanden sowohl einen hohen Qualitätsanspruch als auch eine große Affinität zu Automobilen besitzen.

Für eine statistische Auswertung wurden den Probanden vorab Fragen zu Alter, Geschlecht, Verwendung einer Sehhilfe, einer möglichen Farbfehlsichtigkeit und zu vorhandenen lichttechnischen Erfahrungen gestellt. Da nach Baer [7] für eine repräsentative Auswertung einer Probandenstudie mindestens 20 Ergebnisse vorliegen müssen, nehmen an den ersten Teilversuchen der Probandenstudie zunächst mehr als 20 Personen teil (siehe Abbildung 4.9). Jedoch wurde nach einer eingehenden Prüfung der Ergebnisse die Probandenanzahl reduziert, da

nach Baer bei stabilen Ergebnissen die Möglichkeit besteht, die Anzahl auf 10 Messungen zu verringern [7]. Dies bietet den Vorteil, weitere Versuchsergebnisse zu ermitteln, welche andere Randbedingungen besitzen.

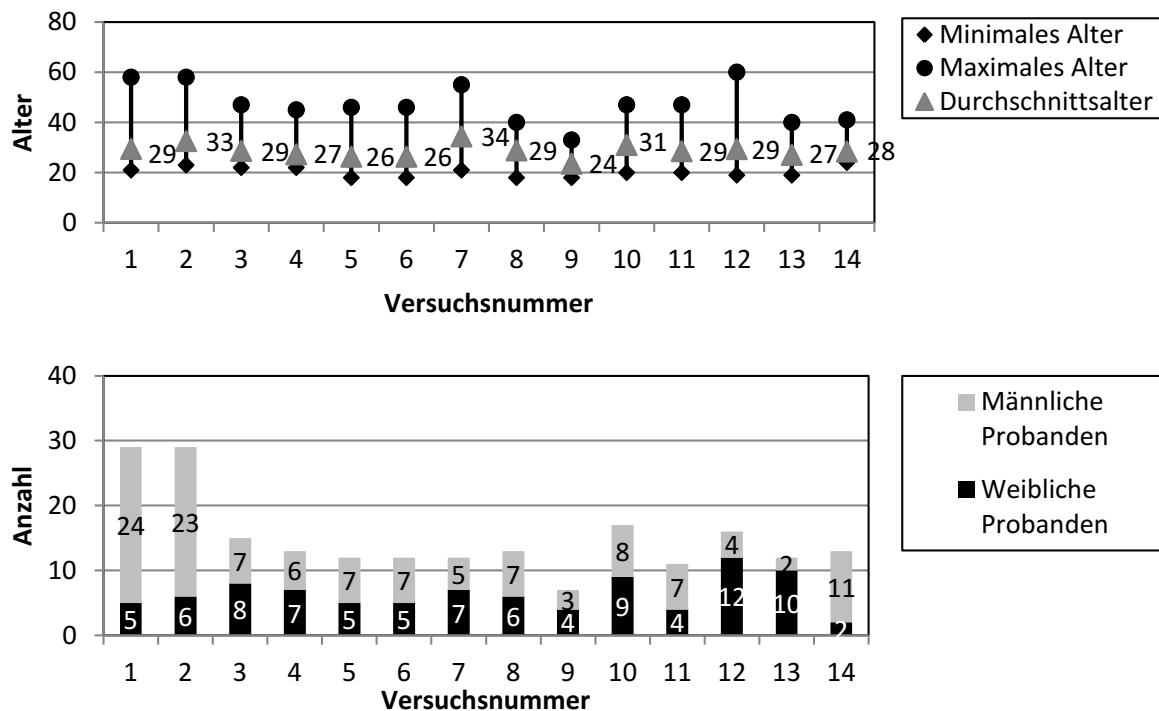


Abbildung 4.9: Teilnehmerstruktur der Probandenstudie

Im Rahmen der Untersuchungen besitzt einer der beiden Positionslichtringe einen konstanten Referenzfarbort. Der Farbort des anderen Rings wird zufällig aus einer Menge von vorab definierten Farborten variiert. Des Weiteren werden teilweise die Umgebungslichtbedingungen verändert sowie zwischen dem äußeren und inneren Positionslichtring als gleichbleibende Farbreferenz gewechselt. Eine Aufschlüsselung der Versuche ist in Tabelle 4.1 zu finden.

Tabelle 4.1: Parametervariationen bei den PWS-Versuchen

Nr.	Proben- anzahl	Referenzfarbvalenz		Auflösung		Referenz	Ring- hellig- keit $\bar{L}_{\text{ÄR}}, \bar{L}_{\text{IR}}$ in [cd/m ²]	Umfeld- hellig- keit L_B in [cd/m ²]
		x	y	$\Delta u'v'$	$\Delta u'v'_{\max}$			
1	230	0,3248	0,3321	0,001	0,025	IR	200	$\approx 0,01$
2	215	0,3367	0,3438	0,001	0,025	IR	200	$\approx 0,01$
3	191	0,3395	0,3583	0,001	0,025	IR	200	$\approx 0,01$
4	159	0,3395	0,3583	0,001	0,025	IR	200	$\approx 3,00$
5	201	0,3235	0,3197	0,001	0,025	IR	200	$\approx 0,01$
6	102	0,3233	0,3204	0,002	0,025	ÄR	200	$\approx 0,01$
7	205	0,3235	0,3448	0,001	0,025	IR	200	$\approx 0,01$
8	197	0,3367	0,3318	0,001	0,025	IR	200	$\approx 0,01$
9	105	0,3367	0,3318	0,002	0,025	IR	250	$\approx 0,01$
10	198	0,3132	0,3057	0,001	0,025	IR	200	$\approx 0,01$
11	100	0,2899	0,3083	0,002	0,025	IR	200	$\approx 0,01$
12	192	0,2994	0,2898	0,001	0,025	IR	200	$\approx 0,01$
13	105	0,3358	0,3194	0,002	0,025	IR	200	$\approx 0,01$
14	170	0,3103	0,3601	0,001	0,025	IR	200	$\approx 0,01$

Wie in Abbildung 4.10 gezeigt, werden als Referenzfarbvalenz die Mittelpunkte der aufgespannten Farbräume der LED-Binnings vom Typ Luxeon Rebel ES verwendet, da dieser LED-Typ den kleinsten Farbraum aller für die Kraftfahrzeugbeleuchtung erhältlichen LEDs besitzt und zugleich in verschiedenen Fahrzeugen erprobt wurde [84]. Unter der Annahme, dass sich im Mittelpunkt der aufgespannten Fläche des jeweiligen Binnings die häufigste Anzahl an produzierten LEDs befindet, ist es mit Hilfe der ermittelten Probandenergebnisse möglich, ein Binning der Luxeon Rebel inklusive der Grenzlagen hinsichtlich eines wahrnehmbaren Farbunterschieds zu bewerten.

Für die Probandenversuche wird ein Referenzfarbort $x_{\text{Ref}}, y_{\text{Ref}}$ bzw. nach der Transformation $u'_{\text{Ref}}, v'_{\text{Ref}}$ eine äquidistante Schrittweite $\Delta u'v'$ und eine maximale Distanz $\Delta_{\max} u'v'$ vom Referenzfarbort festgelegt. Der Referenzfarbort dient als Ursprungsfarbort des nachfolgend berechneten Farbkollektivs und stellt die gleichbleibende Farbvalenz des jeweiligen Referenzpositionslichttrings dar (siehe Abbildung 4.11). Über die maximale Distanz und die Schrittweite werden die Auflösung und die Anzahl der dargebotenen Versuchsfarbvalenzen des anderen Positionslichttrings gesteuert. Die Farbwertanteile der Farbvalenzen entfernen sich sternenförmig in acht Richtungen ($0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, \dots, 315^\circ$) vom Referenzfarbort in der $u'v'$ -Farbtafel. Die Farbwertanteile eines Farbkollektivs wurden unter den genannten Voraussetzungen wie folgt berechnet:

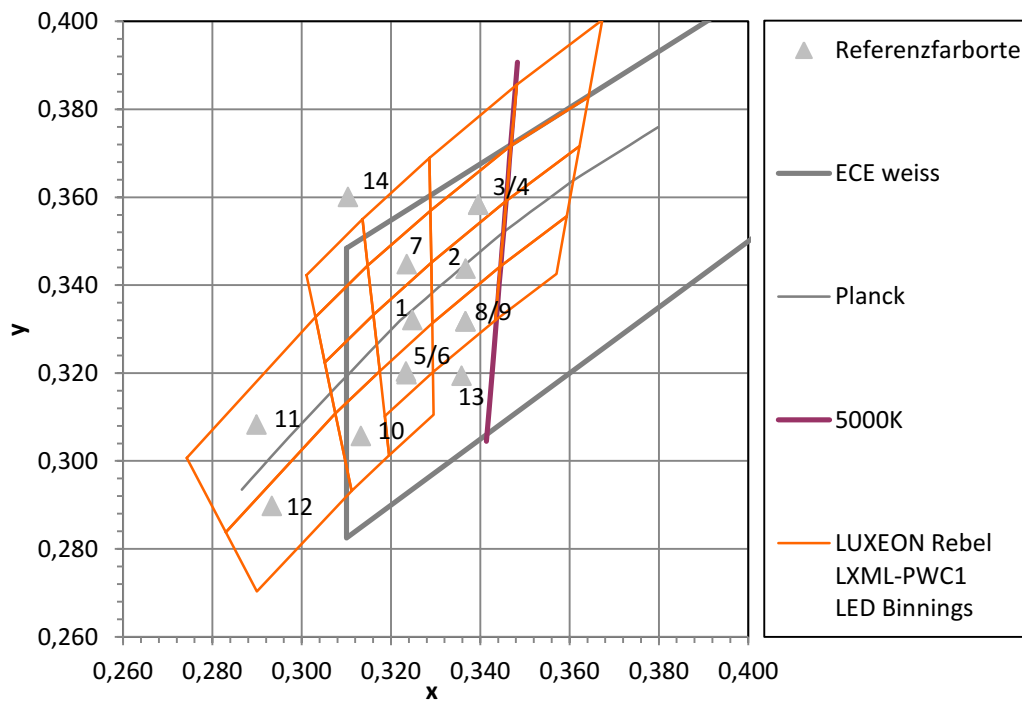


Abbildung 4.10: Referenzfarborte in den PWS-Versuchen im CIE xy-Farbraum [84]

$$u'_{Soll} = i \cdot \Delta u'v' \cdot \cos(45 \cdot j) + u'_{Ref} \text{ mit } \begin{cases} i = 0 \dots \frac{\Delta_{max} u'v'}{\Delta u'v'} \\ j = 0 \dots 7 \end{cases} \quad (4.1)$$

$$v'_{Soll} = i \cdot \Delta u'v' \cdot \sin(45 \cdot j) + v'_{Ref} \text{ mit } \begin{cases} i = 0 \dots \frac{\Delta_{max} u'v'}{\Delta u'v'} \\ j = 0 \dots 7 \end{cases} \quad (4.2)$$

Die in Abbildung 4.11 gezeigte sternenförmige Ausbreitung in acht Richtungen (achte Äste) ermöglicht es einerseits, viele LED-Binningklassen bewerten zu können, und andererseits, Ellipsen gleicher Farbwahrnehmung im CIE xy-Farbraum mathematisch zu bestimmen (siehe Kapitel 3.3.1).

Die jeweiligen Probandenversuche untergliedern sich in drei Teilabschnitte. Der erste Teil dient als Training sowie zur Verinnerlichung der Fragestellung und der Antwortmöglichkeiten. Daher beginnt im Rahmen der Studie ein Versuch stets mit der Darbietung von 60 Trainingsproben. Diese Proben beinhalten ausgewählte Farbvalenzen des gesamten Versuchskollektivs, bei denen eindeutig wahrnehmbare und nicht wahrnehmbare Farbunterschiede zwischen den Ringen für die Probanden sichtbar sind. Im Rahmen einer späteren statistischen Auswertung werden diese Daten der Probandenbefragung jedoch nicht berücksichtigt.

Im zweiten Abschnitt der Probandenbefragung wurde das Farbkollektiv stets mit den Randbedingungen eines äquidistanten Sollwert-Farbortabstands $\Delta u'v' = 0,001$ sowie eines maximalen Abstands vom Referenzfarbort $\Delta u'v'_{max} = 0,025$ gebildet. Die mittlere Leuchtdichte beider Ringe (\bar{L}_{AR} , \bar{L}_{IR}) beträgt, außer in Teilversuch 9, bei allen Teilversuchen sowie innerhalb der Versuchsabschnitte stets 200 cd/m^2 (siehe Tabelle 4.1).

Im dritten Abschnitt eines Probandenversuchs wurde die Auflösung auf $\Delta u'v' 0,002$ herabgesetzt, um den zeitlichen Rahmen der Versuchsreihe von 45 Minuten nicht zu überschreiten. Zum Teil wurden noch weitere Parameter variiert, wobei bei der Versuchsdurchführung darauf geachtet wurde, dass ausschließlich ein weiterer Parameter für die Vergleichbarkeit der Ergebnisse geändert wurde (siehe Tabelle 4.1). Nach jeder Änderung der Farbvalenz des Rings sowie zu Beginn jedes Abschnitts erfolgte eine ausreichende Adaptationsphase. Um Konsistenzeffekte zu vermeiden, bei dem ein Proband aus dem vorangegangenen Versuchsverlauf die Antwort auf eine aktuelle Probe nur vermutet, wurde die Reihenfolge der Farbvalenzen randomisiert dargeboten. Außerdem wurden Wiederholungen der Farbvalenzen in den Versuchsablauf integriert.

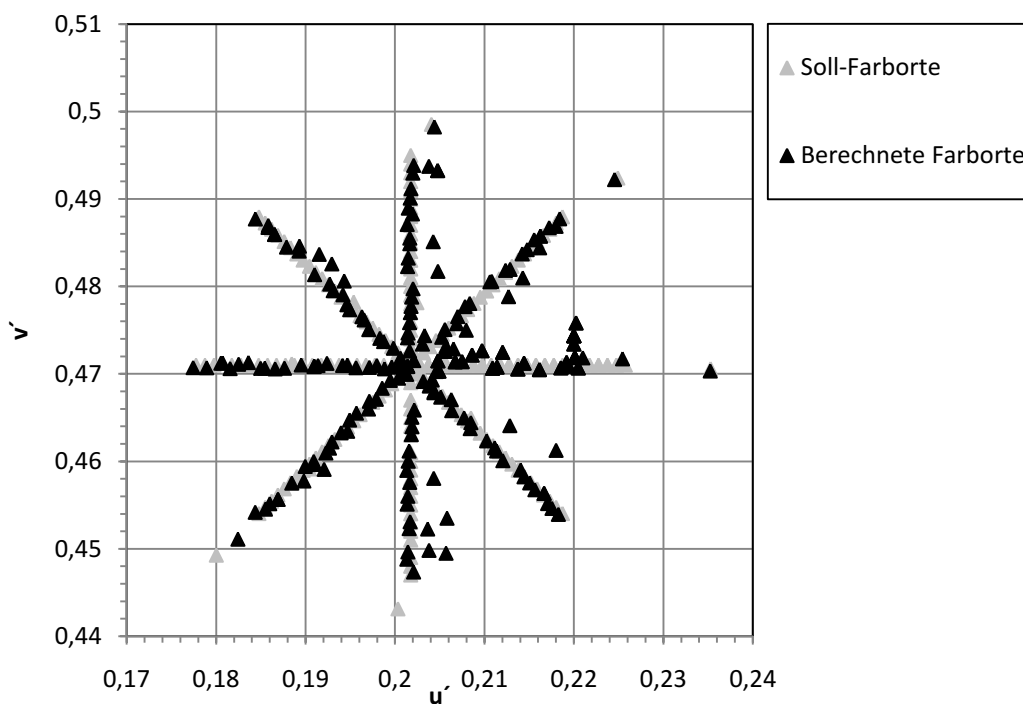


Abbildung 4.11: Darstellung der Vergleichfarborte des äußeren Positionslichtrings aus dem Teilversuch 1 in der CIE $u'v'$ -Farbtafel

In Voruntersuchungen mit frontal zum Simulator positionierten Probanden konnte ermittelt werden, dass Probandenbewertungen zu Proben mit deutlich sichtbaren Farbunterschieden differenziert in Abhängigkeit der Versuchsdauer bewertet wurden. Zu Beginn eines Versuchs

wurden deutlich wahrnehmbare Farbunterschiede als solche von den Probanden erkannt und bewertet. Mit fortschreitender Versuchsdauer konnten dieselben dargestellten Farbunterschiede von den Probanden nicht mehr als solche wahrgenommen werden. Dieses Probandenverhalten kann durch die Blendwirkung des Positionslichts bei der frontalen Betrachtung begründet werden. Um eine dauerhafte Blendung zu vermeiden, ist daher der Beobachter auf einen ortsfesten Stuhl seitlich vom Scheinwerfer positioniert. Zudem ermöglicht es die seitliche Betrachtungsposition, die Vereinfachung zu treffen, dass nur ein Scheinwerfer während der Versuchsreihe notwendig ist, da im realen Fahrzeug die Ringe des anderen Scheinwerfers aus dieser Position nicht sichtbar sind. Der horizontale Winkel zwischen der senkrechten Lichtachse des Scheinwerfers und der Beobachtungsposition beträgt 30° . Dabei ist der Proband entsprechend der typischen Beobachtungsentfernung aus Abschnitt 2.2.2 und auf Grund der baulichen Gegebenheiten des Versuchsraums 2,7 m vom Scheinwerfer entfernt.

Der Proband ist so auf dem Stuhl positioniert, dass der Scheinwerfer foveal fixiert wird. Ein markierter Blickpunkt wurde nicht vorgegeben. Um die Probandenergebnisse nicht negativ durch Unbehagen zu beeinflussen, wurde ein möglichst bequemer Stuhl gewählt und auf eine Fixierung des Kopfs verzichtet. Um eine Beeinflussung einer Fremdlichtquelle außerhalb des Scheinwerfers zu vermeiden, wurde im Rahmen der Versuchsreihe ein simulatorbedingtes Fremdlicht abgeschattet.

Für die Messung der subjektiven Farbunterschiedsempfindung wird dem Probanden zum Verständnis des Versuchs ein Szenario erläutert. Hierbei soll sich der Proband vorstellen, dass dieser im Dunkeln an sein Fahrzeug herantritt und beim Öffnen oder Schließen des Fahrzeugs die Positionslichtringe des Scheinwerfers betrachtet.

Im Zuge der Versuche soll der Proband folgende Fragestellung mit den vorgegebenen Möglichkeiten zu den Positionslichtringen des Scheinwerfers beantworten:

Wie bewerten Sie den Farbunterschied zwischen den beiden Positions-/ Tagfahrlichtringen?

Tabelle 4.2: Bewertungsstufen zur Farbunterschiedswahrnehmung

Ein Farbunterschied ist:

1	2	3	4
nicht wahrnehmbar	gerade wahrnehmbar	eindeutig wahrnehmbar	nicht akzeptabel

Für die Bewertung der Positionslichtfunktion gemäß Tabelle 4.2 wurden den Probanden zusätzlich folgende Anmerkungen gegeben:

- Ein eindeutig wahrnehmbarer Farbunterschied ist für Sie „nicht akzeptabel“, wenn Sie den Scheinwerfer in einer Werkstatt auf Grund der geringen Wertigkeit oder des Eindrucks eines Defekts austauschen lassen würden.

- Es soll nur eine eventuell auftretende Mehrfarbigkeit zwischen und nicht innerhalb der beiden betrachteten Ringe bewertet werden.
- Die Bewertung einer aktuellen Probe soll unabhängig von der Bewertung der vorherigen Probe erfolgen.

In allen Versuchen erwies sich eine Ordinalskala mit 3 + 1 Skalentiefe bezüglich der Entscheidungsmöglichkeit und der Differenzierung als optimal. Mit den ersten drei Skalen bewertet der Proband rein visuell die Wahrnehmbarkeit der Farbunterschiede zwischen den beiden Positionslichtringen. Mit Hilfe der vierten Skala wird die Mehrfarbigkeit zusätzlich hinsichtlich einer Akzeptanz aus Sicht des Probanden bewertet (siehe Tabelle 4.2).

Eine Zusammenfassung der Eckdaten aller Versuche mit dem Positionslichtwarmerscheinungsbildsimulator ist Tabelle 4.3 zu entnehmen.

Tabelle 4.3: Zusammenstellung der Rahmenbedingungen zu den PWS-Versuchen

Rahmenbedingungen zu den PWS-Versuchen	
Anzahl der Ergebnisse	38237
Anzahl der Teilversuche	14
Anzahl Übungsbeispiele	60 je Teilversuch
Form/Kontur der Nachbildung	BMW 5er BJ 2011 (Zwei Ringe unterschiedlicher Größe)
Testzeichenleuchtdichte	200 – 250 cd/m ²
Umgebungsleuchtdichte	≈ 0,01 – 3 cd/m ²
Blickrichtung der Testpersonen	Horizontal 30° nach außen
Dauer des Versuches	30 – 45 Minuten
Anzahl Versuchspersonen	211
Altersgruppe der Probanden	19 – 60 Jahre

4.1.6 Vorstellung der Ergebnisse

Für jede der nachfolgenden statistischen Auswertungen erfolgt die Korrelation der subjektiven und objektiven Versuchsergebnisse durch eine graphische Gegenüberstellung des Medians der Probandenbewertungen p_{Median} zu den jeweiligen Farbwertanteilen der vermessenen Positionslinienringe. Aufgrund der in Kapitel 2.4.3 beschriebenen Gründen sind die Farbwertanteile in der CIE xy-Farbtabelle dargestellt. Zur Orientierung sind in diesen Diagrammen zusätzlich der Plancksche Kurvenzug, die Juddsche Gerade der 5000-Kelvin-Farbtemperatur sowie der von ECE definierte Weißbereich dargestellt.

Die Verwendung des Medians hat im Gegensatz zum arithmetischen Mittel den Vorteil, dass dieser robuster gegenüber extremen Probandenbewertungen ist. Die Ergebnisse des Medians werden mit Hilfe von Symbolen visualisiert und in vier diskrete Bewertungsstufen p_{Median_D} aufgeteilt. Die diskrete Aufteilung berücksichtigt eine jeweilige mittlere Streubreite von $\pm 0,5$ Bewertungsstufen und erfolgt gemäß Tabelle 4.4. Auf eine visuelle Darstellung des statistischen Fehlers wurde bei der Darstellung der Probandenergebnisse in den zuvor genannten Abbildungen aus Gründen der Übersichtlichkeit verzichtet.

Tabelle 4.4: Diskretisierung des Medians der Probandenbewertungen

nicht wahrnehmbar	gerade wahrnehmbar	eindeutig wahrnehmbar	nicht akzeptabel
$p_{Median} < 1,5$	$1,5 \leq p_{Median} < 2,5$	$2,5 \leq p_{Median} < 3,5$	$3,5 \leq p_{Median}$
$p_{Median_D} = 1$	$p_{Median_D} = 2$	$p_{Median_D} = 3$	$p_{Median_D} = 4$

Abbildung 4.12 zeigt beispielhaft die Ergebnisse des ersten Teilversuchs mit dem Positionslichtwarmerscheinungsbildsimulator. Alle weiteren Ergebnisse der Teilversuche 2 bis 14 sind den Abbildungen C.8 - C.20 in Anhang C.5 zu entnehmen.

Eine Betrachtung der Ergebnisse zeigt, dass in dem Versuchskollektiv alle Stufen zur Bewertung hergezogen werden. In der unmittelbaren Umgebung des Referenzfarborts befindet sich die Bewertung „nicht wahrnehmbar“. Je weiter sich der Vergleichsfarort des äußeren Lichtleitungs vom Referenzfarort des inneren Rings entfernt, desto höher ist der Zahlenwert des Medians der Probandenbewertung. Jedoch zeigt sich, dass Bereiche einer Bewertungsstufe von Versuch zu Versuch verschieden sind.

Sowohl in der CIE xy-Farbtabelle als auch in der CIE u'v'-Farbtabelle ist der Abstand vom Referenzfarort bis zu den jeweiligen Farborten der nächst höheren Bewertungsstufe in den jeweiligen Ästen des sternförmigen Versuchskollektivs unterschiedlich. Der Median der Bewertungsabstufung ist in Abhängigkeit des Abstands zwischen dem Vergleichs- und Referenzfarort stetig, da innerhalb dieses Bereichs nahezu keine anderen Bewertungsstufen liegen. Dies zeigt, dass durch die Wahl der Darbietungsreihenfolge der Testfarbe keine Beeinflussung der Ergebnisse der Probandenstudie zu erwarten ist.

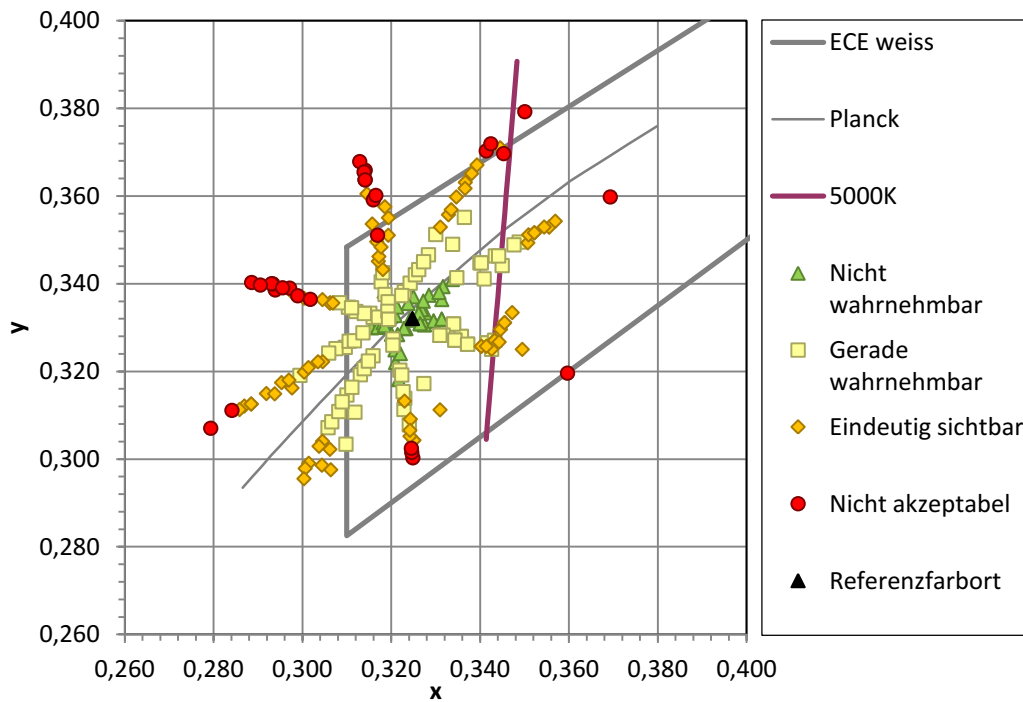


Abbildung 4.12: Darstellung der Probandenergebnisse aus Teilversuch 1 mit dem PWS in der CIE xy-Farbtabelle

Wie bereits MacAdam bestätigt hat, können auch mit Hilfe der ermittelten Ergebnisse Ellipsen zur Eingrenzung gleicher Farbbewertungen bestimmt werden [66]. In dieser Arbeit wird für die Bestimmung der Ellipsenparameter ein mathematisches Verfahren angewandt, welches bereits in Kapitel 3.3.2 erläutert wurde. Als Eingangsgröße für den Berechnungsalgorithmus werden die Farbwertanteile der Vergleichsfarben (x_{Soll} , y_{Soll}) mit der Bewertung „gerade wahrnehmbar“ verwendet, die in den jeweiligen Ästen den weitesten Abstand Δxy vom Referenzpunkt (x_{Ref} , y_{Ref}) besitzen. Somit werden für jeden Ast exakt ein Farbort und insgesamt acht Farborte für einen Versuch ermittelt (siehe Abbildung 4.13). Eine Aufschlüsselung der verwendeten Farborte für jeden Teilversuch ist in Anhang C.6 zu finden.

Die Ellipse kann durch die Parameter a für die große Halbachse, b für kleine Halbachse, den Ellipsenmittelpunkt x_{El} , y_{El} und die Neigung der Ellipse φ parametrisiert werden.

Ein Indiz für die Güte und Verwendbarkeit der approximierten Ellipsenparameter stellt der Abstand zwischen dem Referenzfarbort und dem berechneten Ellipsenmittelpunkt nach Formel 4.3 dar.

$$\Delta xy_{Ref-El} = \sqrt{(x_{El} - x_{Ref})^2 + (y_{El} - y_{Ref})^2} \quad (4.3)$$

Je größer der Abstand, desto weniger exakt ist das Ergebnis approximiert. Dies gilt jedoch nur näherungsweise für unbunte Farben. Je näher am Rand der Farbtafel, desto weiter weg muss sich die Referenz vom Ellipsenmittelpunkt befinden.

Tabelle 4.5 beinhaltet alle Parameter der approximierten Ellipsen zur Probandenbewertungsstufe ein Farbunterschied ist „eindeutig wahrnehmbar“. Des Weiteren ist der euklidische Abstand zwischen dem Referenzfarbort und dem ermittelten Ellipsenmittelpunkt aufgeführt.

Tabelle 4.5: Parameter der approximierten Ellipsen der Teilversuche 1 - 14

Nr.	Ellipsenachsen		Rotation	Ellipsenmittelpunkt		Abweichung	Fläche
	a	b	φ in [rad]	x_{EI}	y_{EI}	$\Delta xy_{\text{Ref-EI}}$	A
1	0,0332	0,0147	-0,7491	0,3247	0,3311	0,0010	0,0015
2	0,0317	0,0155	-0,7366	0,3372	0,3438	0,0005	0,0015
3	0,0324	0,0149	-0,7057	0,3412	0,3548	0,0039	0,0015
4	0,0324	0,0146	-0,7701	0,3438	0,3565	0,0046	0,0015
5	0,0341	0,0109	-0,7822	0,3254	0,3205	0,0021	0,0012
6	0,0260	0,0122	-0,7283	0,3151	0,3172	0,0088	0,0010
7	0,0280	0,0153	-0,7081	0,3241	0,3421	0,0027	0,0013
8	0,0239	0,0134	-0,7162	0,3378	0,3325	0,0013	0,0010
9	0,0230	0,0164	-0,7846	0,3373	0,3286	0,0032	0,0012
10	0,0265	0,0123	-0,7320	0,3151	0,3080	0,0030	0,0010
11	0,0346	0,0165	-0,7609	0,2930	0,3081	0,0031	0,0018
12	0,0278	0,0121	-0,5652	0,3016	0,2934	0,0043	0,0011
13	0,0310	0,0141	-0,7346	0,3353	0,3177	0,0018	0,0014
14	0,0343	0,0148	-0,5911	0,3125	0,3600	0,0022	0,0016

Unter der Berücksichtigung einer Fehleranalyse ist in Abbildung 4.13 das Ergebnis der Ellipsenapproximation für Teilversuch 1 in Form von drei Ellipsen veranschaulicht. Für alle anderen Teilversuche sind die Abbildungen in Anhang C.7.2 zu finden.

Die mit der durchgezogenen Linie dargestellte Ellipse entspricht dem approximierten Median der Probandenbewertungsstufe ein Farbunterschied ist „eindeutig wahrnehmbar“. Es zeigt sich, dass die verwendeten Grenzfarborte in der unmittelbaren Umgebung des Ellipsenkurvenzugs liegen. Somit ist eine Beschreibung von Farbunterschieden in Lichtleitern mit Hilfe von Ellipsen möglich. Mit dem genannten Algorithmus wird eine Ellipse bestimmt, die den kleinstmöglichen quadratischen Fehler zu den jeweiligen Grenzfarborten besitzt. Durch die gestrichelten Ellipsen wird der Fehlerbereich der Probandenergebnisse abgegrenzt.

Der statistische Fehler jedes Teilversuchs kann mit Hilfe des mittleren Standardfehlers des Medians \bar{e}_{Median} über alle Probandenbewertungen eines Teilversuchs ermittelt werden. e_{Median} ist symmetrisch und kann für eine Normalverteilung aus der Standardabweichung σ und der

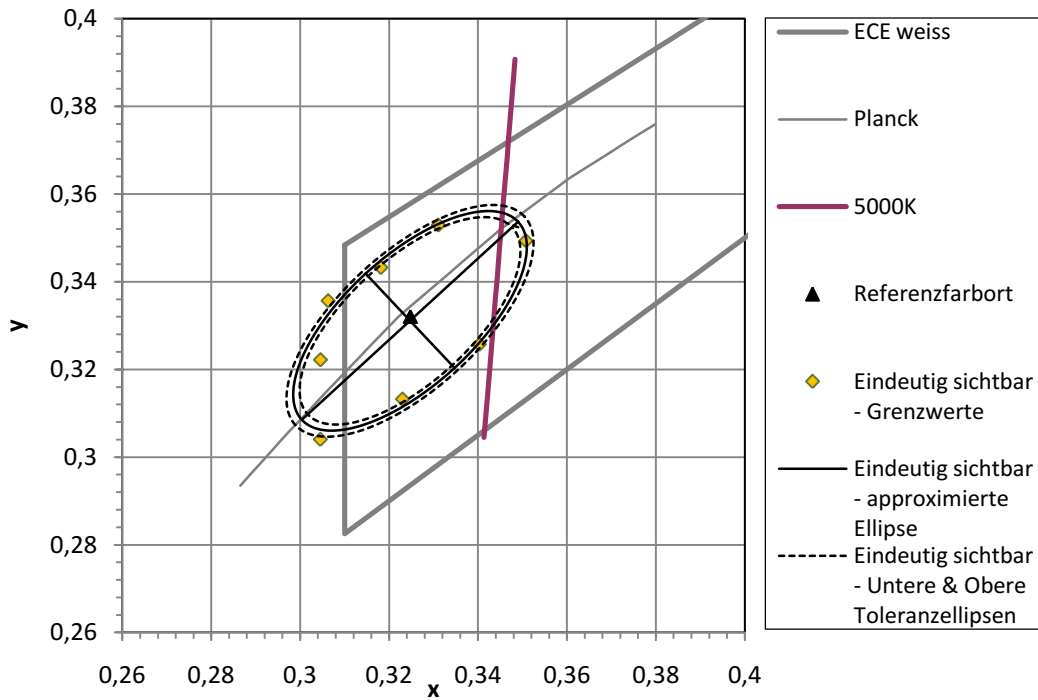


Abbildung 4.13: Darstellung der Farbortgrenzwerte und der approximierten Ellipse von Teilversuch 1 in der CIE xy-Farbtabelle

Anzahl der Proben n nach Gleichung 4.4 bestimmt werden [92]:

$$e_{Median} = \pm \sqrt{\frac{\pi}{2}} \cdot \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (4.4)$$

Somit ergibt sich das Vertrauensintervall des Medians aus der Summe des bestimmten Medians sowie aus dem Fehler e_{Median} . Die Parameter der Ellipsen für die untere und obere Fehlertoleranz a_{min} , a_{max} , b_{min} , und b_{max} , ergeben sich aus den approximierten Ellipsenparametern a und b sowie dem mittleren Fehler des Medians \bar{e}_{Median} über alle Farbvalenzproben eines Teilversuchs wie folgt:

$$a_{max/min} = a \left(1 \pm \frac{\bar{e}_{Median}}{3} \right) \quad (4.5)$$

$$b_{max/min} = b \left(1 \pm \frac{\bar{e}_{Median}}{3} \right) \quad (4.6)$$

Der durchschnittliche, der minimale und der maximale Fehler (\bar{e}_{Median} , e_{min} , e_{max}) der jeweiligen Teilversuche ist in Abbildung 4.14 dargestellt.

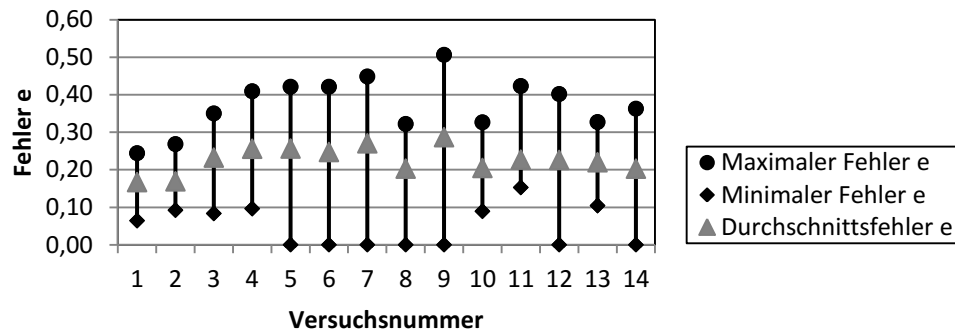


Abbildung 4.14: Darstellung des durchschnittlichen, minimalen und maximalen Fehlers (\bar{e}_{Median} , e_{min} , e_{max}) für alle Teilversuche

Um eine Bewertung von den vorhandenen LED-Binnings im Zusammenhang mit Lichtleitern durchführen und maximal zulässige Binnings bzw. Farbbereiche definieren zu können, wurden die Ellipsenparameter für einen Weißbereich in der CIE xy-Farbtabelle ermittelt. Im Rahmen dieser Arbeit werden dazu die jeweiligen Ellipsenparameter in einem Farbwertanteil von $x = 0,28$ bis $x = 0,35$ und $y = 0,29$ bis $y = 0,36$ linear extrapoliert. Als Datenbasis werden dafür die approximierten Ellipsenparameter aus den vorangegangenen Teilversuchen verwendet. Da in den Teilversuchen 4, 6 und 9 mehr als ein Parameter variiert worden ist, sind diese bei der Extrapolation nicht berücksichtigt.

Das Ergebnis dieser Extrapolation ist in den Abbildungen 4.15 bis 4.17 dargestellt.

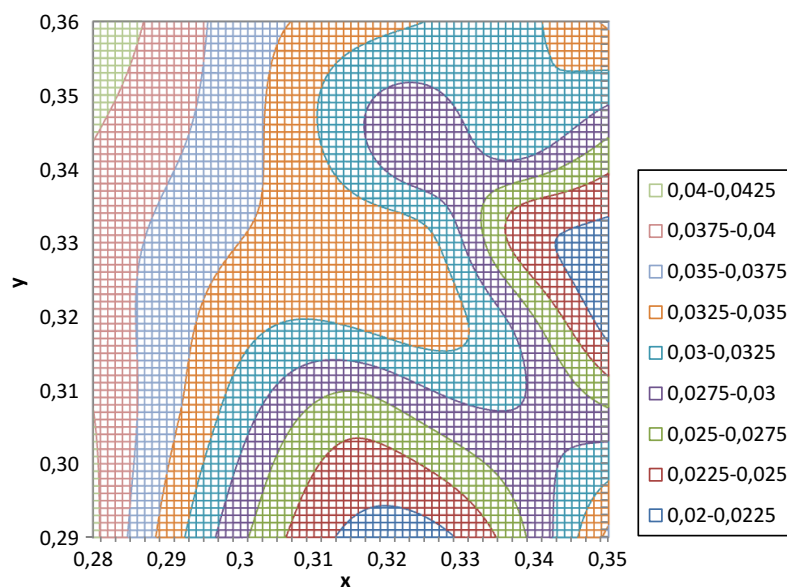


Abbildung 4.15: Darstellung des extrapolierten Ellipsenparameters a aus den Ergebnissen mit dem PWS

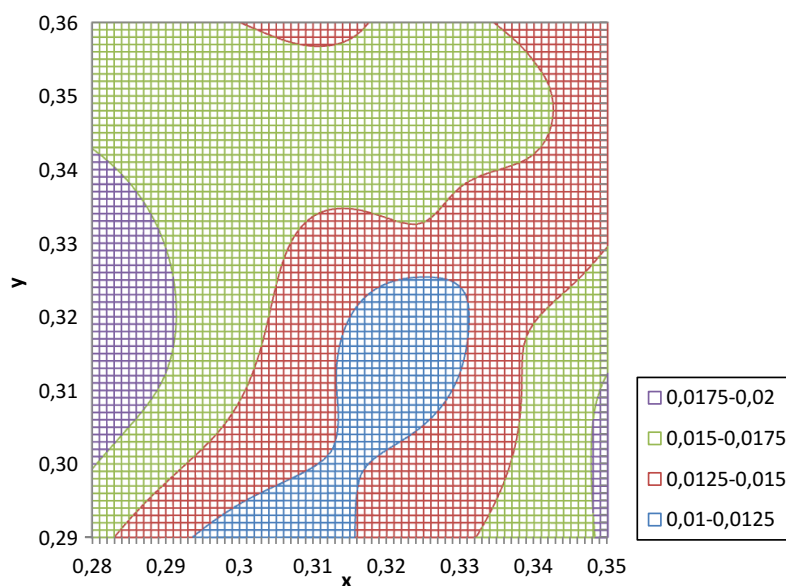


Abbildung 4.16: Darstellung des extrapolierten Ellipsenparameters b aus den Ergebnissen mit dem PWS

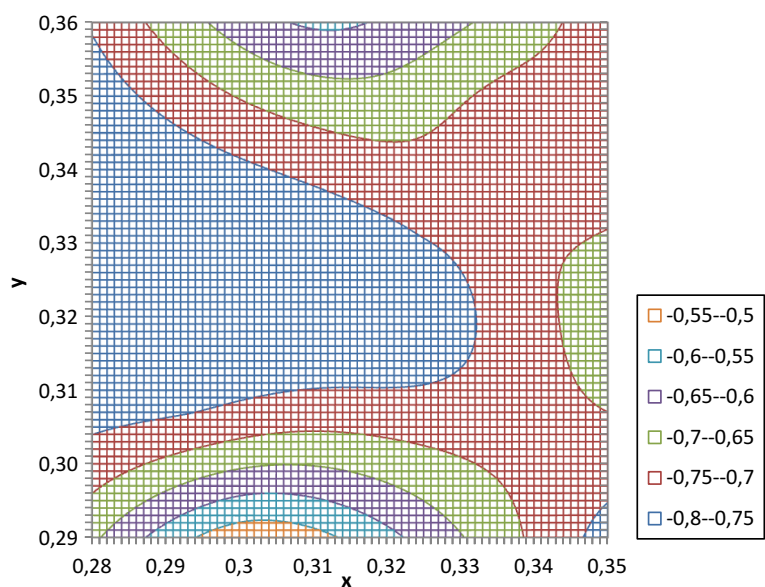


Abbildung 4.17: Darstellung des extrapolierten Ellipsenparameters φ in Radiant aus den Ergebnissen mit dem PWS

4.1.7 Diskussion der Ergebnisse

Mit den Ergebnissen aus den Untersuchungen mit dem Positionslichtwarmerscheinungsbildsimulator kann bestätigt werden, dass die Farbunterschiedswahrnehmung mit Hilfe von Ellipsen parametrisiert werden kann.

Jedoch weichen die in dieser Arbeit ermittelten Ellipsenparameter von den in Kapitel 3.3.1 vorgeschlagenen Werten einer 3-Step bzw. 4-Step MacAdam Ellipse ab. Die Abweichung der Ellipsen umfasst nicht nur die Ausdehnung der Ellipsenachsen, sondern betrifft auch die Neigung der Ellipse zur x-Achse der CIE-Farbtabelle (siehe Tabelle 4.6).

Tabelle 4.6: Vergleich zwischen unterschiedlichen Untersuchungsergebnissen zur Farbunterschiedswahrnehmung [74],[9],[66]

		Ellipsenachsen		Rotation	Ellipsenmittelpunkt		Fläche
		a	b	φ in [rad]	x_{El}	y_{El}	A_{Ellipse}
3-Step	MacAdam	0,00758	0,00203	-1,003	0,314	0,324	0,00005
Ellipse							
4-Step	MacAdam	0,01010	0,00270	-1,003	0,314	0,324	0,00009
Ellipse							
Narendran - 6500 K		0,00705	0,00260	-1,172	0,313	0,324	0,00006
Versuch 30 fc							
Gocke Ellipse		0,03405	0,01350	-0,794	0,314	0,324	0,00144

Auch die Ergebnisse aus einer Studie des Lighting Research Centers von Narendran zeigen eine Abweichung in der Neigung und in der Ausdehnung der Ellipse (siehe Abbildung 4.6) [74]. Hierzu ist anzumerken, dass die Ellipse aus den Daten dieser Untersuchung mit Hilfe des zuvor beschriebenen Verfahrens zur Ermittlung von Ellipsenparametern berechnet wurde. Im Vergleich zu der vorgeschlagenen 3-Step Ellipse sind die im Rahmen dieser Arbeit ermittelten Halbachsen der Ellipsen zwischen 4 - 7 größer als bei der 3-Step MacAdam Ellipse und die Neigung um circa 11° geringer. Die größere Ausdehnung der Ellipsen wird, wie Narendran ebenfalls in seinen Untersuchungen festgestellt hat, mit der Komplexität des Versuchsobjekts begründet. Bei Versuchen mit Lichtleitern ist die Komplexität des betrachteten Versuchsobjekts im Gegensatz zu den homogen ausgeleuchteten Flächen in MacAdams, Bieskes und Narendrans Versuchsaufbauten sehr hoch, da die Probanden lichttechnische Systeme bewerten, die bedingt durch die Prismenstruktur der Lichtleiter durch hohe gleichmäßige Gradienten gekennzeichnet sind [74],[9],[66]. Ein weiterer Unsicherheitsfaktor der MacAdam Untersuchungen besteht darin, dass die Farbbewertungen ausschließlich mit einem einzigen Probanden durchgeführt worden sind.

Bei der Betrachtung der Ergebnisse aus allen Teilversuchen zeigt sich, dass die Parameter a , b und φ ohne eine gewisse Logik variieren (siehe auch Abbildungen 4.15 bis 4.17). Das

bedeutet, dass es in der CIE xy-Farbtabelle innerhalb des untersuchten Bereichs keine eindeutige Abhängigkeiten zwischen der Farbtemperatur und den Ellipsenparametern zu finden waren.

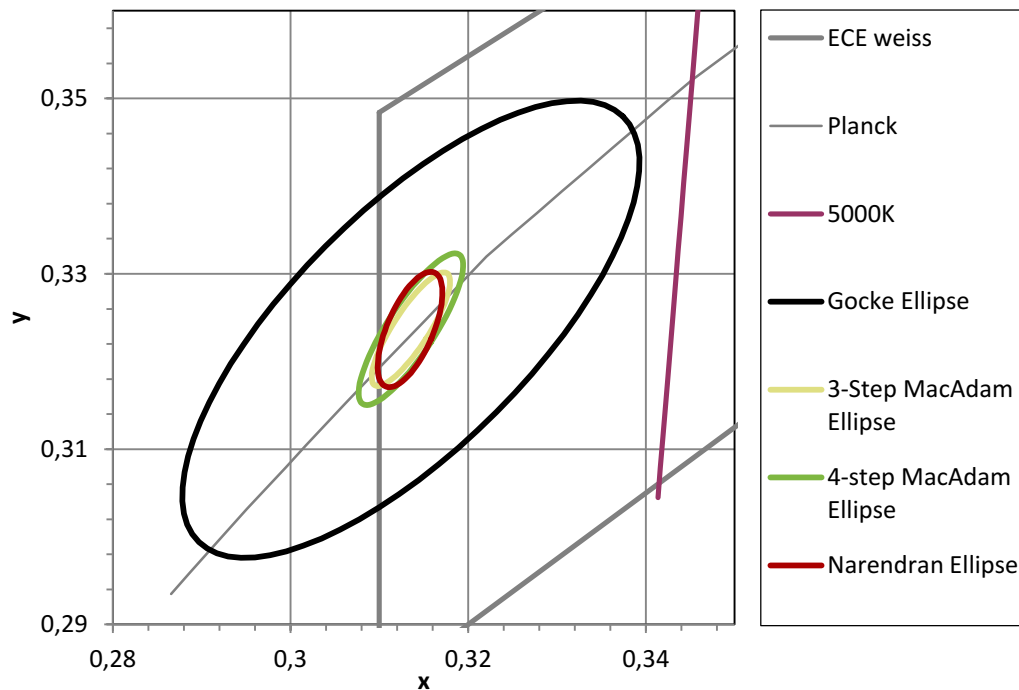


Abbildung 4.18: Vergleich der PWS-Ergebnisse mit anderen Ergebnissen zur Bewertung von Farbunterschieden [117], [74]

Die Analyse der Flächeninhalte $A_{Ellipse}$ der Ellipsen zeigt, dass diese unterhalb des Planckschen Kurvenzugs bis auf eine Ausnahme (Teilversuch 13) stets kleiner sind als oberhalb des Kurvenzugs (siehe Tabelle 4.5). In allen Teilversuchen sind die Probanden für rötliche und grünliche Farbnuanceabweichungen sensibler und bewerten diese im Hinblick auf eine Akzeptanz kritischer als bläuliche und gelbliche Abweichungen.

Durch Teilversuch 3 und 4 kann bestätigt werden, dass die Probandenbewertung nicht durch eine dunkle und eine durch künstliches Licht beleuchtete Umgebung beeinflusst wird. Auch die Erhöhung der mittleren Leuchtdichten um 50 cd/m^2 wirkt sich bei der Betrachtung des Flächeninhalts der Ellipse aus Teilversuch 8 und 9 nicht entscheidend auf die Probandenbewertung aus.

Da die approximierte Ellipse von Teilversuch 6 nur eine unzureichende Genauigkeit besitzt, kann mit diesem Teilversuch keine eindeutige Aussage darüber getroffen werden, ob die Geometrie des Referenzlichtleiters einen Einfluss auf die Probandenbewertung nimmt.

Die Übertragbarkeit der ermittelten Grenzwerte auf andere Geometrien wird in weiteren Validierungsversuchen mit unterschiedlichen geometrischen Formen der Lichtleiter in Abschnitt 4.2 untersucht.

Dies gilt ebenso für die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf LED-Lichtquellen, da im Zuge der Untersuchungen mit dem PWS Gasentladungslampen verwendet worden sind, welche ein anderes Spektrum besitzen als LEDs.

4.2 Untersuchungen mit realen Scheinwerfern

4.2.1 Ziel der Untersuchungen

Ein Ziel der nächsten Untersuchungen ist es, die Übertragbarkeit der mit dem Positionslicht-Warmerscheinungsbildsimulator ermittelten Grenzwerte für verschiedene Scheinwerfer mit anderen Geometrien (unterschiedlichen geometrischen Formen der Lichtleiter), mit einer höheren Anzahl an leuchtende Flächen, mit unterschiedlichen Flächenabständen zueinander sowie mit anderen mittleren Helligkeitsniveaus zu bestätigen. Im nächsten Schritt wird geprüft, ob die Bewertung von farblichen Inhomogenitäten allein durch die Verwendung der Farborte der eingesetzten LEDs hinreichend gut abgeschätzt werden können. Auf Basis dieser Ergebnisse sollen derzeit für die Anwendung in der Automobilbeleuchtung zur Verfügung stehende LED-Binnings hinsichtlich der Verwendbarkeit geprüft werden. Anschließend soll aus den Ergebnissen aus den PWS-Versuchen ein eigener Vorschlag für eine Definition eines anwendungsbezogenen, sinnvollen LED-Binnings erarbeitet werden.

4.2.2 Versuchsaufbau

Für die Validierung der Versuchsergebnisse des Positionslicht-Warmerscheinungsbildsimulators wird ein Scheinwerfer aus der BMW 5er Baureihe verwendet. Für die Vergleichbarkeit der Ergebnisse wurde die Akzentleuchte (AL) oberhalb der Lichtleitringe analog des PWS-Versuchs abgeklebt.



Abbildung 4.19: Darstellung der Versuchsscheinwerfer des Validierungsversuchs (Fotos zum Teil entnommen aus [1])

Zur Überprüfung der Übertragbarkeit der Ergebnisse auf andere Geometrien werden zusätzlich Versuche mit Scheinwerfern aus der BMW 3er und 7er Baureihe aus dem Baujahr

2012 durchgeführt. Alle Scheinwerfer besitzen eine unterschiedliche geometrische Gestaltung (siehe Abbildung 4.19). Der verwendete BMW 5er Scheinwerfer entspricht geometrisch dem Scheinwerfer aus den PWS-Versuchen.

Im Gegensatz zu den vorherigen Versuchen werden bei den Validierungsversuchen reale LED-Grenzmuster zur Erzeugung der Mehrfarbigkeiten verwendet, die im Zuge eines Versuchs vom Versuchsleiter getauscht werden. Um einen Eindruck von der Dimension der Validierungsversuche zu bekommen, ist in Tabelle 4.2.2 die Anzahl der verwendeten LED-Grenzmuster, der Darbietungsszenarien und der Geometrien in Abhängigkeit der Teilversuche aufgeschlüsselt.

Tabelle 4.7: Aufschlüsselung der Daten der Validierungsversuche

Versuchsnummer	1	2	3
Scheinwerfer	5er Scheinwerfer	3er Scheinwerfer	7er Scheinwerfer
Anzahl der Farbgrenzmuster	9 x Ringe	4 x Ringe 2 x Akzentleuchte	4 x Scheinwerfer
Anzahl der Darbietungs-szenarien	31	12	4

4.2.3 Bewertung der photometrischen Systemeigenschaften

Für die Bewertung der Farborte werden die Lichtleitringe aller Scheinwerfern analog zu dem in Abschnitt 4.1.3 vorgestellten Verfahren mit dem Speckos1201 in der frontalen senkrechten Position ($H=0^\circ$, $V=0^\circ$ - HV) sowie in einer seitlichen Position ($H=30^\circ$, $V=0^\circ$ - H30) vermessen. Die Farborte der jeweiligen im BMW 5er Scheinwerfer verbauten Farbgrenzmuster sind in Abbildung 4.20 veranschaulicht. Es zeigt sich, dass die verwendeten Grenzwertmuster einen relativ großen Bereich in der xy-Farbtabelle einnehmen.

Neben den gemessenen Farborten stehen die herstellerseitigen Farbortangaben der verwendeten LED-Farbgrenzmuster zur Verfügung. Diese sind in Abbildung 4.21 dargestellt.

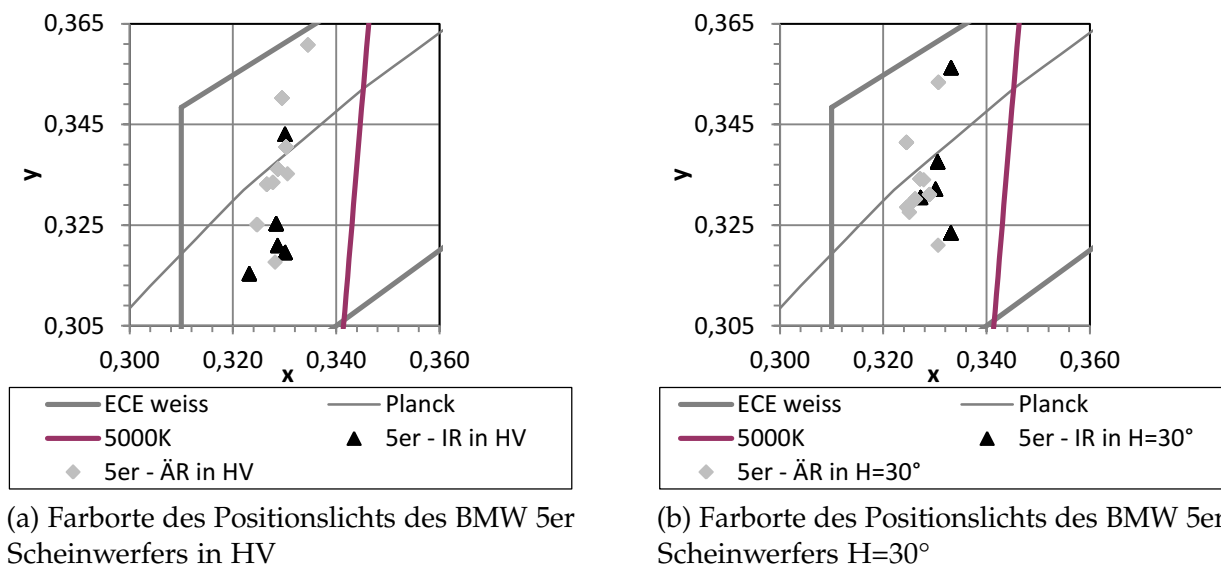


Abbildung 4.20: Farborte des Positionslichts des BMW 5er Scheinwerfers

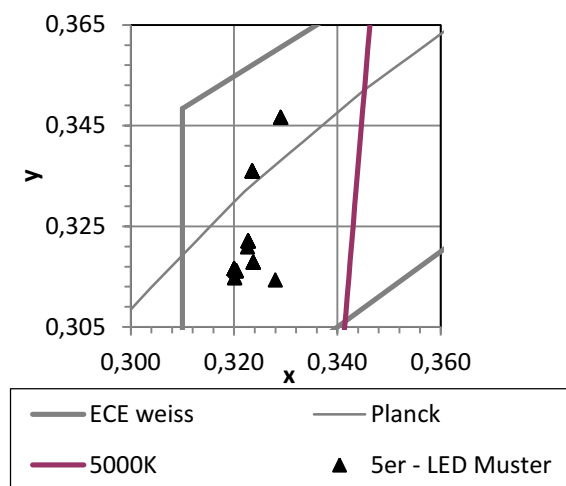


Abbildung 4.21: Farborte der LED-Lichtquellen des BMW 5er Scheinwerfers

Es zeigt sich, dass durch die jeweiligen Lichtleitrings eine unterschiedlich hohe Farbwertanteilverschiebung der ursprünglichen Farborte einer LED erfolgt. Die Tendenz der Farbwertanteilverschiebungen in Richtung von positiven x- und y-Farbwertanteilen (gelb) ist durch materialtechnischen Eigenschaften und die Geometrie des Lichtleitrings begründet (siehe Kapitel 2.3.1.1). Daher wird der ursprüngliche Farbort einer LED durch den äußeren und inneren Ring unterschiedlich stark verschoben.

Für die Probandenversuche mit dem BMW 3er Scheinwerfer stehen vier LED-Grenzmuster für die Ringe und zwei LED-Grenzmuster für die Akzentleuchte zur Verfügung. Die resultierenden Farborte im verbauten 3er Scheinwerfer sind in der Abbildung 4.22 dargestellt. Die Besonderheiten des 3er Scheinwerfers liegen darin, dass beide Ringe dieselbe Geometrie besitzen und dass für die Ringe und die Akzentleuchte dieselben LED-Typen (3x Einzel-LEDs pro Ring; 1x Einzel-LED pro Akzentleuchte) verwendet werden. Auf Grund der großen Länge der Akzentleuchte und der daraus resultierenden größeren Farbverschiebung sind zwar dieselben LED-Typen verwendet worden, jedoch wurde für die Akzentleuchte ein Binning mit einer höheren Farbtemperatur ausgewählt.

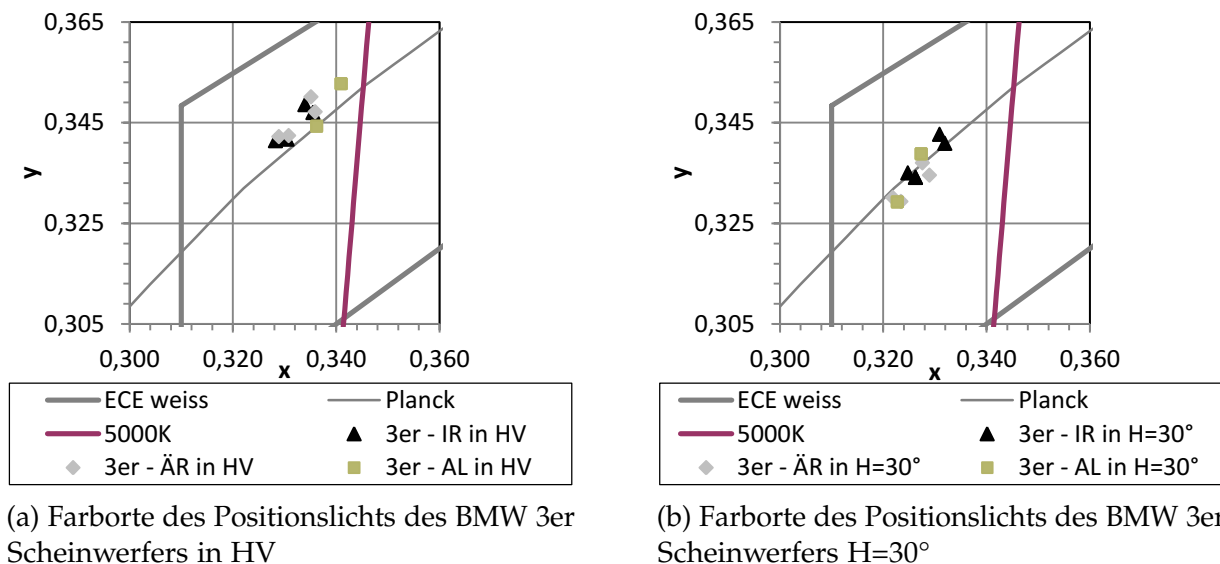


Abbildung 4.22: Farborte des Positionslichts des BMW 3er Scheinwerfers

Dieselbe Geometrie der beiden Ringe zeigt sich ebenfalls in Abbildung 4.22(a), da die Farborte der Ringe nahezu identische Farbwertanteile besitzen. Insgesamt sind alle Farborte der Grenzmuster sowohl in der HV- als auch in der H30-Beobachtungsrichtung konzentriert in der Farbwerttafel verteilt. Durch die Verschiebung der Farbortewolke kann eine Winkelabhängigkeit der Farberscheinung des Scheinwerfers aufgezeigt werden (vgl. Abbildung 4.22(a) zu (b)). Jedoch erfolgt im Falle des 3er Scheinwerfers für die Akzentleuchte und die Ringe eine ähnliche Farbverschiebung.

Auch beim BMW 3er Scheinwerfer stehen die Farborte der LED-Grenzmuster zur Verfügung (siehe Abbildung 4.23). Die Verteilung der Farborte zeigt, dass die Farborte nicht weit auseinander-

derliegen und im Vergleich zum verwendeten BMW 5er LED Binning keine große Spreizung in der y-Richtung der xy-Farbtabelle vorhanden ist. Infolge der photometrischen Messergebnisse der reinen LED-Grenzmuster und der Lichtleiter wird für die folgenden Probandenbewertungen erwartet, dass keine Farbunterschiede für die Probanden „eindeutig wahrnehmbar“ sein werden.

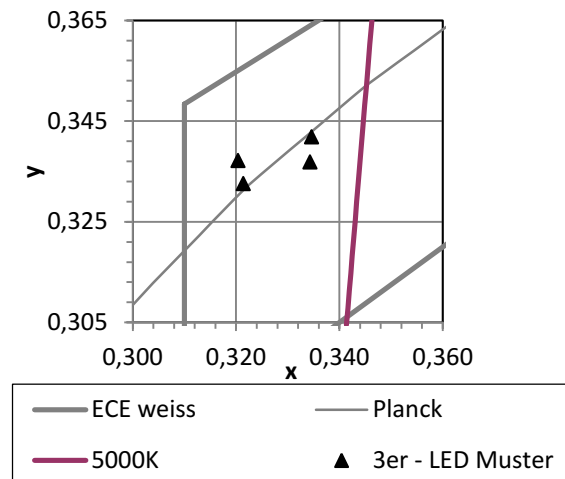
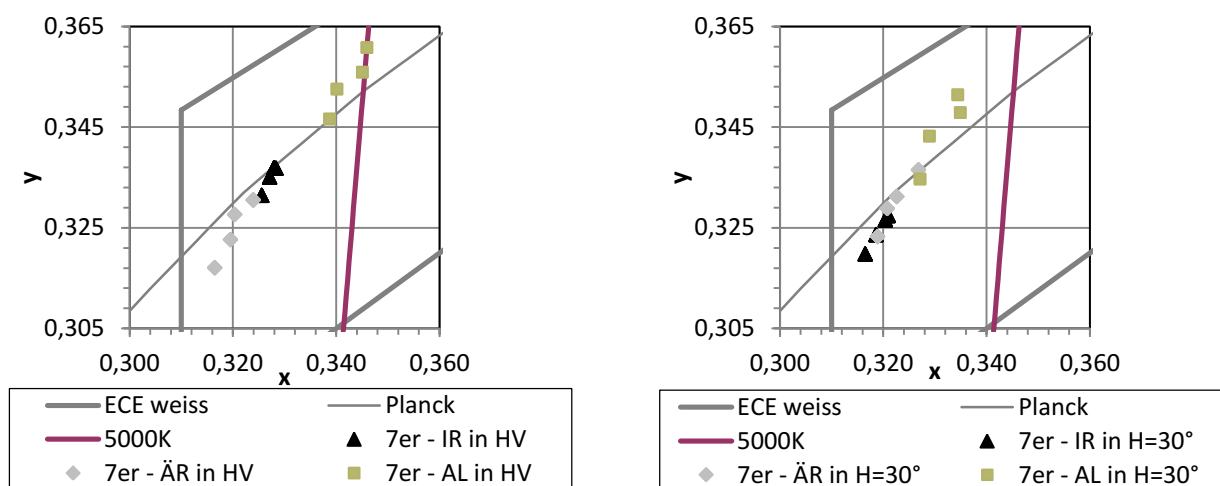


Abbildung 4.23: Farborte der LED-Lichtquellen des BMW 5er Scheinwerfers

Die Farbgleichmuster des BMW 7er Scheinwerfers liegen nicht als einzeln verbaubare LED-Gleichmuster vor, die untereinander getauscht werden können, sondern in Form von vier Scheinwerfern. Die Farborte der Ringe und der Akzentleuchte sind für den verwendeten BMW 7er Scheinwerfer in Abbildung 4.24 dargestellt.



(a) Farborte des Positionslichts des BMW 7er Scheinwerfers in HV

(b) Farborte des Positionslichts des BMW 7er Scheinwerfers H=30°

Abbildung 4.24: Farborte des Positionslichts des BMW 7er Scheinwerfers

Ein Vergleich zwischen Abbildung 4.24(a) und (b) zeigt, dass die Farborte der Akzentleuchte im Gegensatz zu den Ringen eine deutlich höhere Richtungsabhängigkeit aufweisen. Bei der

Messung in HV liegen die Farborte der Ringe und der Akzentleuchte in einem minimalen Abstand $\Delta_{xy} \approx 0.012$ voneinander entfernt und bei der Messung in $H=30^\circ$ ist der minimale Abstand Δ_{xy} nahezu null. Die sehr unterschiedliche Richtungsabhängigkeit zwischen den Ringen und der Akzentleuchte ist damit zu erklären, dass die Akzentleuchte eine sehr gebogene Geometrie in Fahrzeuglängsachse besitzt.

4.2.4 Versuchsprotokoll und –durchführung

Mit Hilfe der LED-Grenzmuster wurden 856 Probandenergebnisse zur Empfindung von Farbunterschieden ermittelt. Dazu wurden insgesamt drei Teilversuche durchgeführt, bei denen sich die Versuchsobjekte in ihrer Geometrie und ihrem Helligkeitsniveau unterscheiden. Bei diesen Versuchen haben insgesamt 52 Probanden teilgenommen. Die genaue Aufschlüsselung der Probandenstruktur zum Alter und zum Geschlecht ist in Abbildung 4.25 dargestellt.

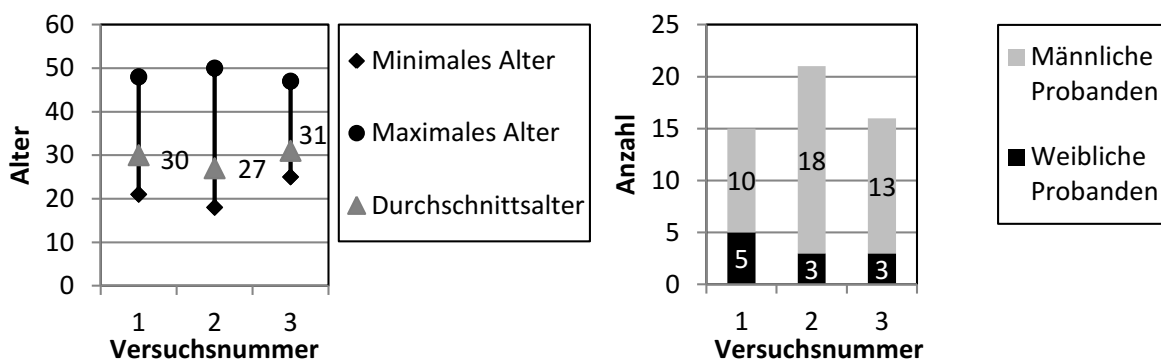


Abbildung 4.25: Teilnehmerstruktur der Probandenstudie der Validierungsversuche

Für die teilnehmenden Probanden und die Fragestellung können dieselben Prämissen wie zuvor bei den PWS Versuchen getroffen werden (siehe Kapitel 4.1.5). Anders als bei den PWS Versuchen, bewerten die Probanden die Versuchsscheinwerfer sowohl unter einem Beobachtungswinkel von $H=30^\circ$ und $V=0^\circ$, als auch in der senkrechten HV-Richtung. So kann überprüft werden, ob unterschiedliche Beobachtungswinkel zu einer anderen Gesamtbewertung führen. Bei den Versuchen haben die Probanden stets die Aufgabe, eine gesamthafte Bewertung zur Mehrfarbigkeit eines Scheinwerfers abzugeben.

Bei den Versuchen mit den Farbgrenzmustern des 3er und 5er Scheinwerfers bewertet der Proband stets nur zwei leuchtende Flächen. Im Falle des 5er Scheinwerfers wird von dem Probanden die farbliche Homogenität beider Ringe zueinander bewertet. Im Zuge des Teilversuchs mit dem BMW 3er Scheinwerfers bewerten die Probanden die Mehrfarbigkeit sowohl zwischen der stabförmigen Akzentleuchte und einem Ring als auch zwischen zwei Ringen ohne Aktivierung der Akzentleuchte. Im Teilversuch mit dem 7er Scheinwerfer haben die Probanden die Aufgabe, eine Gesamtbewertung von drei leuchtenden Flächen bestehend aus zwei Lichtleitringen und einem stabförmigen Lichtleiter abzugeben.

Tabelle 4.8: Zusammenstellung der Rahmenbedingungen zu den Validierungsversuchen zur Farbunterschiedswahrnehmung

Rahmenbedingungen	
Anzahl der Ergebnisse	856
Anzahl der Teilversuche	3
Form/Kontur	BMW 5er BJ 2011 (Zwei Ringe unterschiedlicher Größe) BMW 7er BJ 2012 (Zwei Ringe unterschiedlicher Größe und eine Akzentleuchte) BMW 3er BJ 2012 (Zwei gleichgroße Ringe und eine Akzentleuchte)
Testzeichenleuchtdichte bei seitlicher Betrachtung	$\approx 200 - 1250 \text{ cd/m}^2$
Umgebungsleuchtdichte	$\approx 0,01 \text{ cd/m}^2$
Blickrichtung der Testpersonen	Horizontal 30° nach außen HV
Dauer der Versuche	10 – 30 Minuten
Anzahl Versuchspersonen	52
Altersgruppe der Probanden	19 – 50 Jahre

Abschließend sind alle Eckdaten zur Beschreibung der Durchführung der Validierungsversuche in Tabelle 4.8 dargestellt.

4.2.5 Vorstellung der Ergebnisse

Die Auswertung der Probandenversuche erfolgt durch eine graphische Gegenüberstellung des Medians aus den Bewertungen zu den präparierten Scheinwerferkonfigurationen der jeweiligen Teilversuche. Zusätzlich ist der Fehler des Medians nach Sachs analog Kapitel 4.1.6 dargestellt [92]. Die Farborte der einzelnen leuchtenden Teilflächen der verschiedenen Scheinwerfer sowie die dazugehörige Kodierung sind Anhang D zu entnehmen.

In Abbildung 4.26 sind die Probandenbewertungen des ersten Validierungsversuchs mit dem BMW 5er Scheinwerfer visualisiert. Es zeigt sich, dass das Versuchskollektiv im Bewertungsspektrum von „1 - nicht wahrnehmbar“ bis hin zu „4 - nicht akzeptabel“ differenziert bewertet. Für die Entwicklung eines Scheinwerfers bedeutet dieses Ergebnis, dass das verwendete LED-Binning nicht uneingeschränkt für die Verwendung in Scheinwerfern mit Lichtleitringen empfohlen werden kann. Es kann nun bestätigt werden, dass es auf Grund eines Verbaus von Grenzlagen-LEDs eines derartigen Binnings zu Kundenbeanstandungen kommen kann, da für einen Kunden Farbunterschiede im Scheinwerfer sichtbar sind. Jedoch besteht wegen den differenzierten Probandenbewertungen (Durchschnittliche Bewertungen 1 bis 4) zu den LED-Grenzmustern aus dem 5er Scheinwerfer die Möglichkeit, die Ergebnisse zur Farbunterschiedswahrnehmung aus Abschnitt 4.1.6 zu validieren.

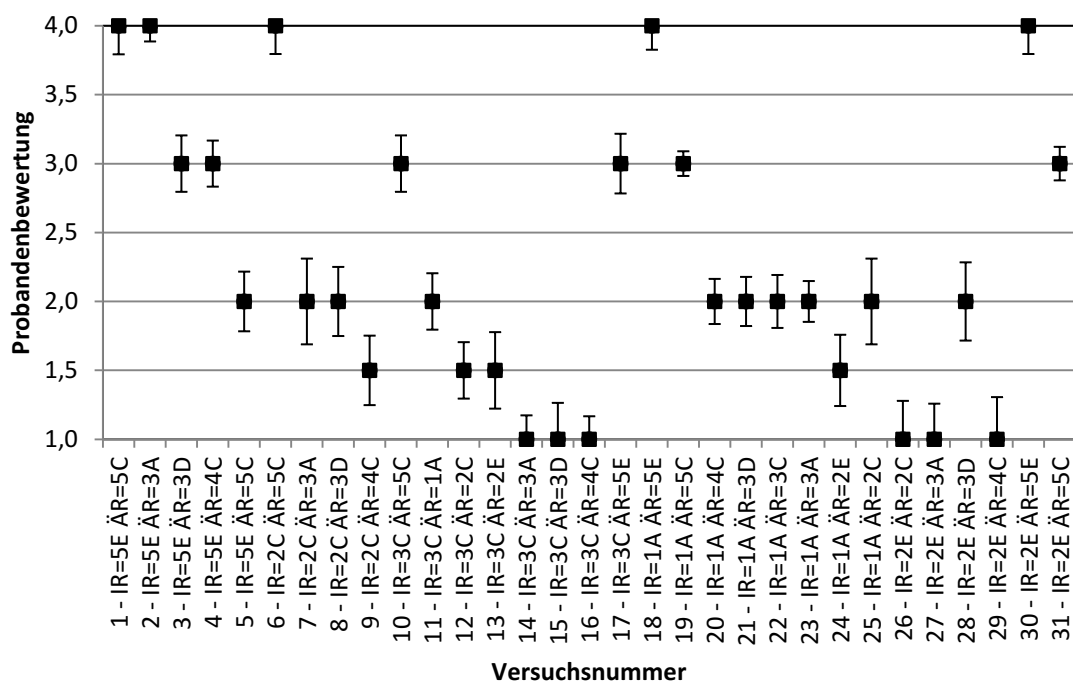
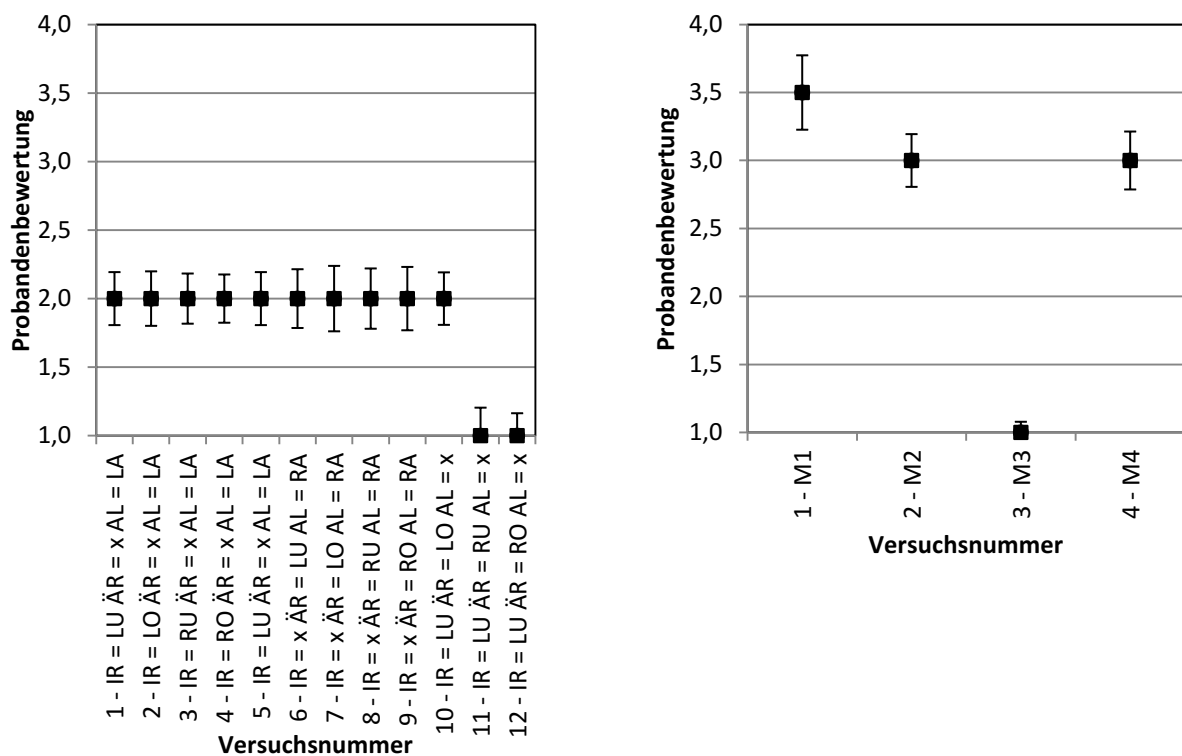


Abbildung 4.26: Median der Probandenbewertung und der Fehler des Medians (Teilversuch 1)

In Abbildungen 4.27(a) und (b) sind die Probandenbewertungen aus den Teilversuchen 2 und 3 dargestellt. Der Median der Probandenbewertungen zu den Grenzmustern des BMW 3er Scheinwerfers nimmt keine Stufen größer als „2 - eindeutig wahrnehmbar“ an. Wenn davon ausgegangen werden kann, dass von dem LED-Lieferanten wirklich Grenzmuster in den äußersten Ecken des LED-Binnings für den Versuch zur Verfügung gestellt wurde, kann die Verwendung des LED-Binnings im Scheinwerfer unter funktionalen Aspekten empfohlen werden. Zudem bestätigt dieses Ergebnis, dass unter der Vielzahl der vorhandenen LED-Typen zumindest ein LED-Binning die hohen Anforderung an zu verhindernde Mehrfarbigkeiten im Scheinwerfer erfüllt (mehr dazu in Abschnitt 4.2.7).



(a) Untersuchungen mit dem BMW 3er Scheinwerfer

(b) Untersuchungen mit dem BMW 7er Scheinwerfer

Abbildung 4.27: Median der Probandenbewertung und der Fehler des Medians (Teilversuche 2 und 3)

Dass eine Akzentleuchte einen negativen Einfluss auf die Gesamtbewertung der farblichen Homogenität nimmt, kann anhand des Validierungsversuchs mit dem BMW 7er Scheinwerfer bestätigt werden. Wie in Abbildung 4.27(b) dargestellt, werden drei von vier Scheinwerfern als farblich inhomogen bewertet. Laut der Probanden erfolgt diese negative Bewertung des Gesamtscheinwerfers jedoch nicht auf Grund der Lichtleitringe zueinander, sondern wegen einer sichtbaren Mehrfarbigkeit zwischen den Ringen und der stabförmigen Akzentleuchte. Die Fragestellung inwiefern die Akzentleuchte einen Einfluss auf die Unterschiedserkennbarkeit zwischen den Lichtleitringen nimmt, ist somit hinfällig, da die Probanden die farbliche

Homogenität des gesamten Scheinwerfers stets an den Flächen mit den größten farblichen Unterschieden festmachen.

4.2.6 Validierung des Modells zur Bewertung von farblichen Inhomogenitäten

Für die Validierung der farblichen Homogenitätsbewertung wird die Annahme getroffen, dass das Modell nicht nur für den Positionslicht-Warmerscheinungsbildsimulator gilt, sondern auch auf andere Umgebungslichtbedingungen, Geometrien, andere Helligkeitsniveaus, LED-Lichtquellen und auf mehr als zwei leuchtende Flächen übertragbar ist. Zudem wird angenommen, dass sich die Gesamtbewertung des Probanden stets aus dem am schlechtesten beurteilten Erscheinungsbild einer Probe ergibt. Dies bedeutet, dass die Gesamtbewertung ausschlaggebend beeinflusst wird, wenn in der frontalen oder in der seitlichen Betrachtung ein Farbunterschied deutlich wahrnehmbar ist. Daher erfolgt die Validierung des Modells mit den in der frontalen und in der seitlichen Beobachtungsrichtung gemessenen Farborten.

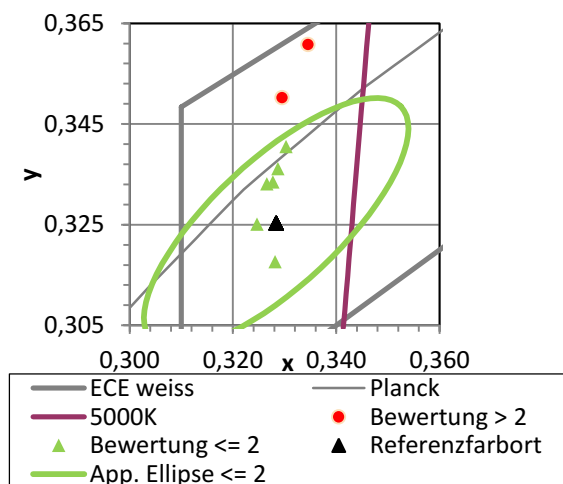
Für die Überprüfung des Modells zur Erkennbarkeit von Mehrfarbigkeiten in Lichtleitsystemen werden als erstes die approximierten Ellipsen aus Abschnitt 4.1.6 verwendet. Jeder Farbort einer leuchtenden Teilfläche (Ringe, Stab) stellt den Mittelpunkt einer Ellipse zur Farbbewertung dar. Sind in der Schnittmenge alle Farborte der Teilflächen enthalten, dann ist nach dem Modell ein Farbunterschied im Lichtleitsystem höchstens „gerade wahrnehmbar“. Mit diesem Verfahren kann klar zwischen einem eindeutigen und einem gerade sichtbaren Farbunterschied, also zwischen binären Zuständen, differenziert werden. In der Regel ist dies für die Bewertung einer farblichen Homogenität ausreichend, da ein Kunde ab dieser Stufe einen Farbunterschied bewusst wahrnimmt.

Im nächsten Schritt wird der Median der Probandenbewertungen dem Modellergebnis gegenüber gestellt. Hierfür wird das Probandenergebnis gemäß der Modellierung angepasst und in nur zwei Gruppen unterteilt. Die Bewertungsstufen „1 - nicht wahrnehmbar“ und „2 - gerade wahrnehmbar“ bilden die erste Klasse (Bewertung ≤ 2) und die Bewertungsstufen „3 - eindeutig wahrnehmbar“ und „4 - nicht akzeptabel“ stellen die zweite Klasse (Bewertung > 2) dar. Unterscheidet sich das Modellergebnis von dem Median der Probandenbewertung, liegt ein Fehler im Modell vor. Diese beschriebene Modellvalidierung erfolgt separat für jede Betrachtungsposition und gesamthaft für beide Positionen. Bei der Gesamtbewertung werden die Ergebnisse mit einer Oder-Verknüpfung bewertet.

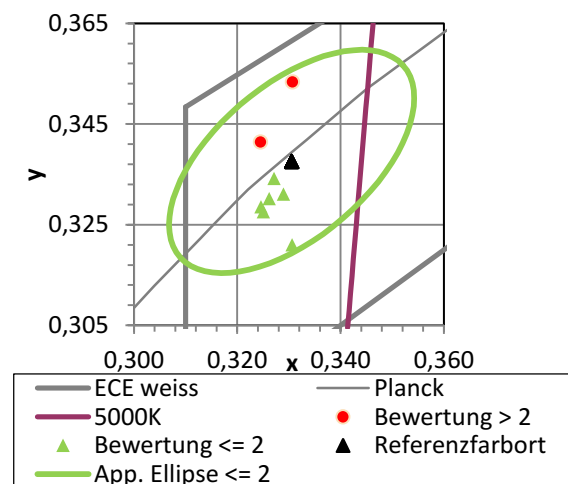
Dieses Verfahren wird zunächst beispielhaft für einen Teilversuch mit dem BMW 5er Scheinwerfer in Abbildung 4.28 dargestellt. Die Symbole stellen die Farborte der gemessenen Teilflächen in der CIE xy-Farbtafel aus dem Teilversuch dar. Ein Teilversuch beschreibt einen konstanten Referenzfarbort für den inneren Ring des BMW 5er Scheinwerfers. Das größere dreieckige Symbol definiert den Referenzfarbort und stellt zugleich den Mittelpunkt der approximierten

Ellipse dar. Aus Gründen der Übersichtlichkeit ist in Abbildung 4.28 nur eine Ellipse visualisiert. Über die Form der Symbole ist die Probandenbewertung zur jeweiligen Teilfläche kodiert. Kleinere dreieckige Symbole beschreiben einen Median von ≤ 2 . Die runden Symbole stellen einen Median von > 2 dar. Befindet sich ein rundes Symbol außerhalb oder ein dreieckiges Symbol innerhalb der dargestellten Ellipse, ist die approximierte Bewertung des Modells für die jeweilige Messposition korrekt. Bei einer Probandenbewertung von mindestens „eindeutig wahrnehmbar“ muss in den Darstellungen für die frontale und für die seitliche Betrachtung mindestens eines der beiden Symbole für die jeweilige Bewertungssituation außerhalb der Ellipse liegen.

In Abbildung 4.28 ist diese Situation für zwei Beobachtungsszenarien aufgeführt. Es werden zwei Darbietungsszenarien gezeigt, die von den Probanden in der gesamthaften Bewertung aus beiden Beobachtungsrichtungen im Median als > 2 bewertet werden. Bei der Betrachtung in HV (siehe Abbildung 4.28(a)) befinden sich die vermessenen Farborte außerhalb der approximierten Ellipse. Die Vorhersage der Mehrfarbigkeitsbewertung durch das Modell ist allein für die Betrachtungsrichtung in HV korrekt. Bei der seitlichen Betrachtung liegen die vermessenen Farborte derselben verbauten Farbgrenzmuster beider Ringe enger beieinander (siehe Abbildung 4.28(b)). Die zwei durch Kreise symbolisierten Farborte befinden sich nun innerhalb der approximierten Ellipse. Bei einer alleinigen Bewertung der zuletzt genannten Konstellation ist die Modellvorhersage falsch. Da sich das Gesamtergebnis aus der Oder-Verknüpfung beider Teilergebnisse ergibt, kann eine korrekte Vorhersage erzielt werden.



(a) Farborte des Positionslichts des BMW 5er Scheinwerfers in HV



(b) Farborte des Positionslichts des BMW 5er Scheinwerfers H=30°

Abbildung 4.28: Darstellung der Probandenergebnisse aus Teilversuch 1 mit IR = 3C

Ausgehend von dieser Beschreibung wird für alle Teilversuche des Validierungsversuchs 1 in Tabelle 4.9 die Fehlerquote der Vorhersage bezogen auf die Beobachtungsposition und hinsichtlich der Gesamtbewertung aufgeschlüsselt. Es zeigt sich, dass das Modell je nach Scheinwerfertyp Vorhersagefehler bei einer singulären Bewertung sowohl in HV-Richtung als

auch in seitlichen Betrachtungspositionen macht. Die reduzierte Fehleranzahl der kombinierten Modellbewertung bestätigt die These, dass die Ergebnisse mit einem logischen Oder verknüpft werden sollten.

Tabelle 4.9: Fehlerquote der modellierten Farbunterschiedsbewertung

Versuch	Darbietungs-szenarien	Prozentualer Fehler mit einer Oder-Verknüpfung	Prozentualer Fehler mit einer Oder-Verknüpfung inkl. Ellipsenfehlertoleranz
1	31	26%	9%
2	12	0%	0%
3	4	0%	0%
Gesamt	47	19%	6%

Auf den ersten Blick erscheint die Fehlerrate mit 26% in Teilversuch 1 recht hoch. Jedoch zeigt eine genauere Betrachtung der vermessenen Referenzfarborte in Kombination mit den jeweiligen Vergleichsfarborten sowie der approximierten Grenzellipsen, dass das generierte Modell der Farbbewertung trotzdem stimmig ist. Wie verschiedene Abbildungen in Anhang D.2 zeigen, liegen einige vermessene Farborte grenzwertig außerhalb der ermittelten Ellipsen. Unter der Berücksichtigung der zuvor dargestellten Fehlertoleranzen der Ellipsenparameter kann die Fehlerrate von Teilversuch 1 auf einen Wert von 9% (3 Fehler) reduziert werden.

Die niedrige Fehlerrate aus Teilversuch 2 und 3 belegt, dass das Bewertungsmodell ebenfalls auf andersartige Geometrien, wie einen Lichtleitring und -stab, anwendbar ist. Darüber hinaus kann durch den dritten Teilversuch mit dem 7er Scheinwerfer bestätigt werden, dass das Modell zur Farbunterschiedsbewertung bei mehr als zwei leuchtenden Flächen mit unterschiedlichen Geometrien ohne Bedenken verwendet werden kann.

Die Gesamtfehlerrate liegt unter Berücksichtigung aller Ergebnissen aus allen drei Teilversuchen bei einem Wert von 6%. Die Anwendbarkeit der aus den PWS-Untersuchungen ermittelten Grenzwerte kann hiermit bestätigt werden.

Zu Beginn des Kapitels wurde erläutert, dass für die LEDs des BMW 3er und 5er Scheinwerfers die vermessenen Farborte vorliegen. Auf Basis dieser Farborte wird eine Analyse hinsichtlich einer Fehlerrate der Modellvorhersage und der Probandenbewertung gemacht. Die Ergebnisse zeigen sich in Tabelle 4.10.

Es zeigt sich, dass die Fehlerrate sehr gering ist. Somit ist es möglich, allein durch die Farborte der Lichtquellen, auch ohne die Farbverschiebung eines Lichtleiters, eine erste Aussage über eine Mehrfarbigkeit im Scheinwerfer zu treffen.

Tabelle 4.10: Fehlerquote der modellierten Farbunterschiedsbewertung unter der Verwendung der LED-Farborte

Versuch	Darbietungs- szenarien	Anzahl Fehler	der Prozentualer Fehler
1 - nur LEDs	31	0	0%
2 - nur LEDs	12	0	0%

4.2.7 Modellbasierte Bewertung derzeitiger LED-Binnings

Allgemein können die Ellipsen wie folgt interpretiert werden: Bezogen auf die Referenzfarbe ist jeder Farbunterschied innerhalb der Ellipse nur „gerade wahrnehmbar“. Für die Definition eines maximalen zulässigen Binnings können diese Ellipsen jedoch nicht verwendet werden. Dies hat folgende Gründe: Wenn Farborte miteinander verglichen werden, die sich auf weit entfernten Punkten der Ellipse befinden, können Farbunterschiede dennoch „eindeutig wahrnehmbar“ sein. Zusätzlich muss berücksichtigt werden, dass die Ellipsenparameter je nach Ursprungsort des Ellipsenmittelpunkts unterschiedliche Zahlenwerte annehmen. Daher ist der maximal zulässige Farbbereich ohne einen „eindeutig wahrnehmbaren“ Farbunterschied kleiner als die zuvor ermittelten Ellipsen.

Ein maximaler „gerade wahrnehmbarer“ Farbbereich in der CIE xy-Farbtabelle kann durch das Aufspannen einer Fläche mit mindestens drei Farborte definiert werden, die für die Bestimmung des Bereichs die Ellipsenmittelpunkte darstellen. Sind für jeden dieser Farborte Ellipsenparameter vorhanden, kann durch eine Untersuchung der Schnittmengen aller Ellipsen und der Farborte die Farbunterschiedswahrnehmung vorausgesagt werden. Dazu muss lediglich separat für jede Ellipse überprüft werden, ob alle anderen Farborte innerhalb der jeweiligen Ellipsenflächen liegen.

Dies wird in Abbildung 4.29 in Form von drei Ellipsen und drei Farborten dargestellt, die den Ellipsenmittelpunkten entsprechen. Die Schnittmenge der drei Ellipsen ist zusätzlich durch eine gestrichelte Linie markiert. In dem in Abbildung 4.29 vorgestellten Beispiel befinden sich alle Farborte innerhalb der Schnittmenge. Farbunterschiede innerhalb der gestrichelten Fläche sind für die Probanden nicht „eindeutig wahrnehmbar“.

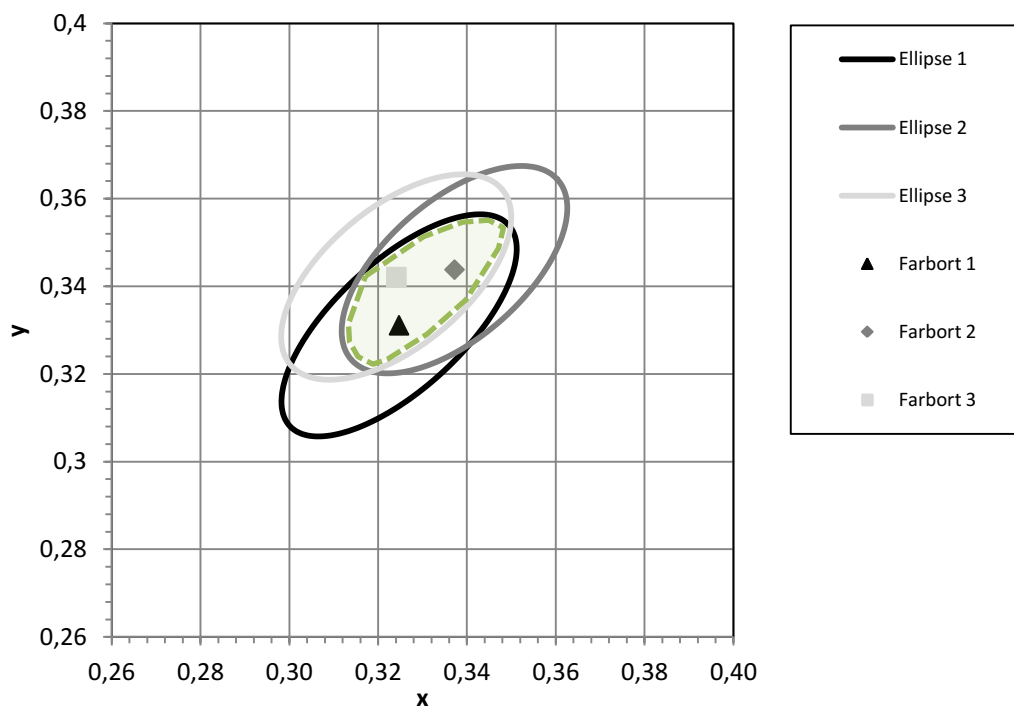


Abbildung 4.29: Bestimmung eines maximal zulässigen Farbbereichs

Im nächsten Schritt wurden verschiedene im Automobilbereich gesetzte LED-Binnings hinsichtlich einer Mehrfarbigkeit mit Hilfe des zuvor beschriebenen Prozesses bewertet. Die durch den Lichtleiter bedingte Verschiebung des Farbborts wird hierbei nicht berücksichtigt. Die Bewertung der LEDs hinsichtlich eines Einsatzes in Verbindung mit Lichtleitern ist in Tabelle 4.11 aufgelistet. Aussagen zu anderen optischen Systemen, z.B. nebeneinander angrenzende Reflektoren, können an dieser Stelle nicht exakt getroffen werden, jedoch wird die Annahme getroffen, dass die Grenzwerte für die Erkennung von Mehrfarbigkeiten ähnlich sind, da Reflektor- und Lichtleitsysteme dasselbe Helligkeitsniveau und ein ähnlich strukturbasiertes Erscheinungsbild besitzen.

In Tabelle 4.11 zeigt sich, dass bei jedem der untersuchten LED-Binnings Mehrfarbigkeiten auf Grund der Farbborte in den Extremlagen sichtbar sein können. Wie häufig diese Mehrfarbigkeit in der Serienproduktion eines Scheinwerfers sichtbar ist, hängt von der Ausprägung der LED-Produktion und vom Verbauprozess der LEDs beim Scheinwerferlieferanten ab. Je größer der Bereich des LED-Binnings ist, desto höher wird die Auftrittswahrscheinlichkeit. Von den untersuchten LED-Typen ist die LED vom Typ Rebel ES am besten für den Einsatz in zwei Lichtleitringen geeignet, da der Bereich des Binnings nur grenzwertig nicht in Ordnung ist.

Die LED-Typen Ostar und Advanced Power TopLED besitzen zwar ungefähr dieselbe Ausdehnung in der CIE xy-Farbtabelle wie die Rebel ES, jedoch sind diese nicht so gut geeignet. Dies liegt in der Ausrichtung des Binningbereichs zur x-Farbwertanteil-Achse begründet. Eine

Betrachtung der Abbildungen 4.30(a) und (b) zeigt, dass die Ausrichtung des Rebel ES Binnings im Gegensatz zu der Advanced Power TopLED nahezu die Neigung der zwei dargestellten Grenzwert-Ellipsen entspricht. Aus Gründen der Übersichtlichkeit sind jedoch nur zwei der vier Ellipsen dargestellt. Aber auch anhand der zwei Ellipsen zeigt sich, dass bei der Advanced Power TopLED ein viel größerer Bereich des Binnings außerhalb der Schnittmenge der Ellipsen liegt. Auf Grund der dargestellten Beobachtungen wird für die Verwendung von LED-Binnings die Empfehlung gegeben, nur LEDs zu verwenden, deren Binnings eine ähnliche Ausrichtung wie die aus Abschnitt 4.1.6 bestimmten Ellipsen besitzen.

Tabelle 4.11: Bewertung von LED-Binnings verschiedener Hersteller für die Verwendung in Lichtleistersysteme

LED-Typ	Binbezeichnung	Mehrfarbigkeit sichtbar
Osram OSTAR	HL, IL, JL, GM, HM, IM, JM, KM	Ja
Osram Golden Dragon	5P, 6P, 7P, 5Q, 6Q, 7Q, 5R, 6R, 7R	Ja
Osram Advanced Power TopLED	JK, JL, KK, KL, NK, NL, OK, OL	Ja
Philips Rebel ES	YO, YA, XP	Ja
Philips Rebel ES	XM, XN, XO, WM, WN, WO, WP, WQ, VM, VN, VO, VP, UM, UN, UO, UP	Nein, aber grenzwertig
Philips Rebel Automotive	A1, A2, A3, A7, A8	Ja
Nichia RANK	a0, a3, b1, b2, b3, b4, b5, b6, b7, b8, c0, c1, c2	Ja

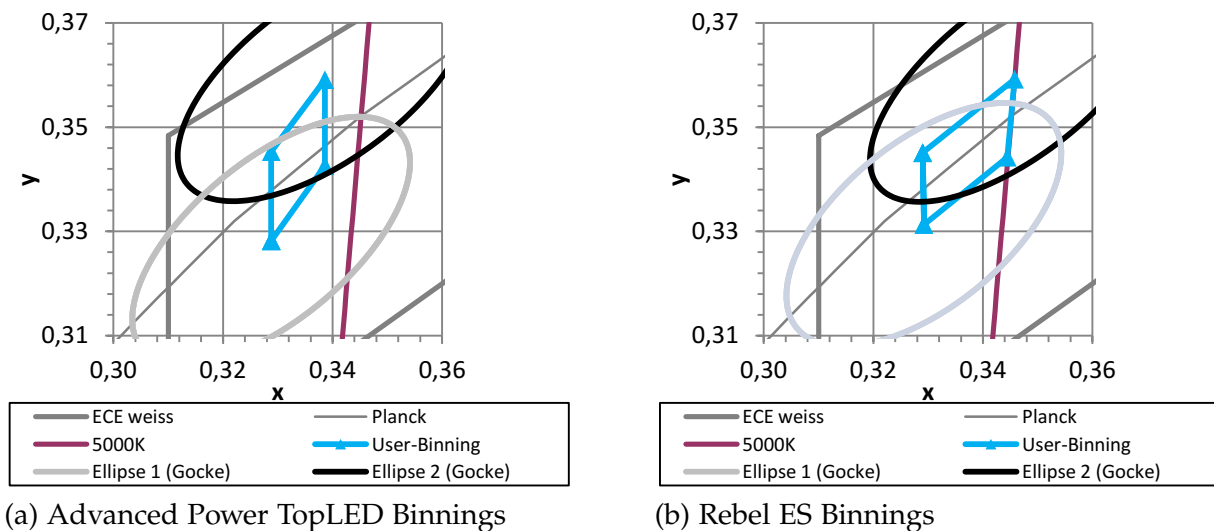


Abbildung 4.30: Bewertung von LED-Binnings in Kombination mit den ermittelten Grenzwertellipsen

4.2.8 Diskussion der Ergebnisse

Mit Hilfe der Validierungsversuche kann die Übertragbarkeit der Ergebnisse aus den Versuchen mit dem Positionslicht-Warmerscheinungsbildsimulator auf reale Scheinwerfer mit LED-Lichtquellen bestätigt werden. Dies ist durch die geringe Fehlerrate belegt. Die Fehlerrate wurde im Zuge der Versuchsauswertung durch die Oder-Verknüpfung der korrelierten subjektiven Probandenbewertungen und den objektiven Farbwertanteilen der senkrechten und der seitlichen Betrachtungsposition ermittelt. Für die gesamthafte Bewertung des Farbunterschieds ist stets die Position mit dem größten Farbunterschied maßgebend.

Die unterschiedlichen Lichtspektren der Gasentladungslampe und der LED nehmen keinen Einfluss auf die Probandenbewertung. Diese These wurde ebenfalls durch Narendrans Untersuchungen zur Farbunterschiedswahrnehmung bestätigt [74].

Durch die Validierungsversuche mit den realen Scheinwerfern zeigt sich, dass die ermittelten Ellipsenparameter aus Kapitel 4.1.6 für eindeutig wahrnehmbare Farbunterschiede unabhängig von der geometrischen Form eines Lichtleiters anwendbar sind.

Auch der Helligkeitsunterschied von einer Leuchtdichte zwischen ca. 200 cd/m^2 bei den PWS-Versuchen und ca. 1300 cd/m^2 bei den Validierungsversuchen beeinflusst die Bewertung nicht. Eine Übertragbarkeit der Ergebnisse ist auch hier gegeben. Diese Erkenntnisse decken sich mit Ergebnissen aus anderen Untersuchungen von Narendran und Bieske [74], [9].

Die Vernachlässigung der lichtleiterbedingten Farbverschiebung innerhalb der CIE xy-Farbtabelle beeinflusst die Bewertung eines LED-Binnings hinsichtlich einer Wahrnehmbarkeit eines Farbunterschieds nicht stark. Daher wird die alleinige Bewertung von „eindeutig wahrnehmbaren“ Farbunterschieden durch die Analyse der LED-Binning-Ausdehnung innerhalb der xy-Farbtabelle

empfohlen. Mit den Ergebnissen aus Abschnitte 4.2.7 konnte gezeigt werden, dass die derzeit zur Verfügung stehenden LED-Binnings eine zu große Ausdehnung in der xy-Farbtabelle besitzen, wenn diese LEDs in Verbindung mit mehreren Lichtleitern gesetzt werden sollen.

Von Narendran [74] wird für die Anwendung von direkt nebeneinander angeordneten oder direkt sichtbaren LEDs und bei einer Beleuchtung einer einfarbigen weißen Wand ein Binning mit einer maximalen Größe einer 2-Step MacAdam Ellipse vorgeschlagen. Für andere komplexere Anwendungen oder bei nicht direkt sichtbaren LEDs empfiehlt Narendran ein LED-Binning mit einer Ausdehnung von einer 4-Step MacAdam Ellipse. Als komplexere Anwendung definiert Narendran z.B. die Beleuchtung von einem aufwendigen, mehrfarbigen Bild in einem Museum [74].

Nach der ANSI NEMA ANSLG C78.377-2008 wird ein viereckiger Bereich in der CIE xy-Farbtabelle für das Binning von LEDs vorgeschlagen. Dieser Bereich entspricht der Ausdehnung einer 7-step MacAdam Ellipse [4].

Für die eigene Ermittlung eines maximalen zulässigen Binnings wurden als Eingangsgröße die Daten aus den Abbildungen 4.15 bis 4.17 verwendet. Mit Hilfe eines Algorithmus werden acht temporäre Farborte sternförmig und gleichmäßig verteilt, um einen frei wählbaren Farbort zu generieren. Jeder dieser acht Farborte dient als Mittelpunkt einer zu berechnenden Ellipse. Wie in Abschnitt 4.2.7 erläutert, wird mit Hilfe des Algorithmus überprüft, ob alle Mittelpunkte in der Schnittmenge aller Ellipsen liegen. Ist dies der Fall, so kann einer der Ellipsenmittelpunkte weiter vom Benutzer definierten Farbort entfernt werden. Die Schrittweite für den Algorithmus liegt bei $\Delta xy = 0,001$. Der Prozess mit der Entfernung zum Referenzpunkt wird soweit fortgesetzt bis sich einer der acht Mittelpunkte nicht mehr innerhalb der Schnittmenge befindet. Eine andere Alternative für die Bestimmung eines maximalen zulässigen Binnings liegt darin, zunächst einen zentralen Farbort zu definieren. Anschließend wird um dieses Zentrum eine halb so große Ellipse gelegt, die die Schnittmenge von unendlich vielen Farborten darstellt.

Das Ergebnis des Algorithmus ist beispielhaft in Abbildung 4.31 für den Referenzfarbort $x = 0,31355$ und $y = 0,32368$ im Zusammenhang mit den vorgeschlagen 2-Step und 4-Step MacAdam Ellipsen sowie mit dem ANSI-Viereck zur Definition von maximalen LED Binnings dargestellt.

Die Überprüfung des ANSI-Vorschlags, der 2-Step und 4-Step MacAdam Ellipse hinsichtlich einer Mehrfarbigkeitswahrnehmung in Verbindung mit Lichtleitern wird analog zu Abschnitt 4.2.7 geprüft.

Es zeigt sich, dass der ANSI-Vorschlag zur Definition von LED-Binnings zu groß für die Anwendung von weißen LEDs in Verbindung mit Lichtleitern ist. Die 2-Step und 4-Step MacAdam Ellipsen sind hingegen für die Anwendung überspezifiziert.

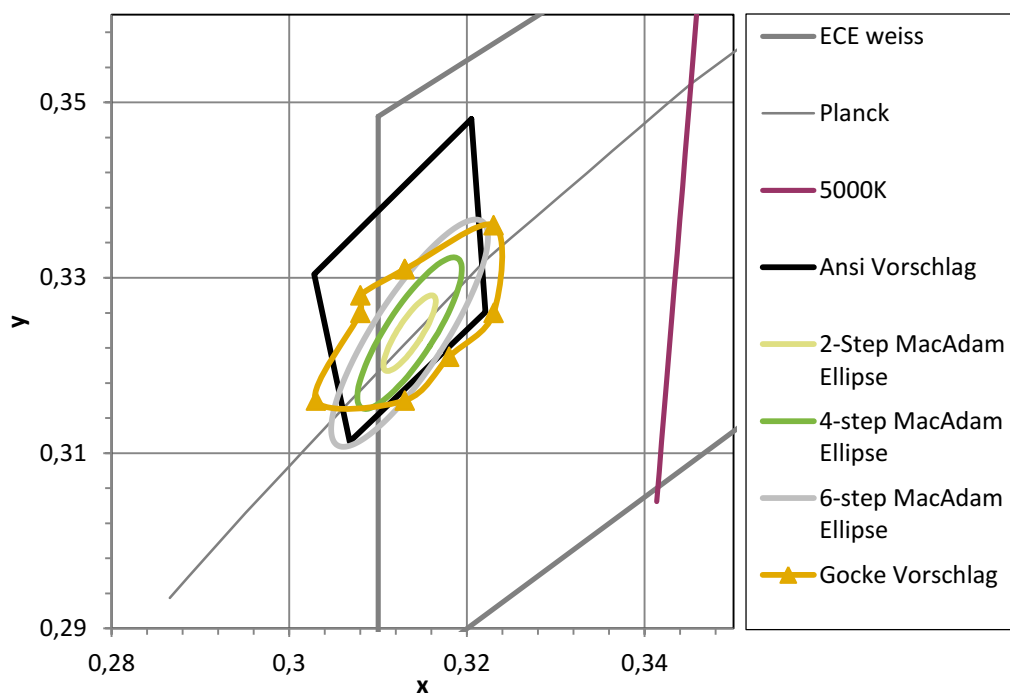


Abbildung 4.31: Vergleich von Definitionen von zulässigen LED-Binnings am Farbpunkt $x=0,31355$ und $y=0,32368$

Aus den ermittelten Ergebnissen kann für Automobilanwendungen mit weißen LEDs in Verbindung mit Lichtleitern folgende Empfehlung hinsichtlich der Auswahl des LED-Binings gegeben werden: Damit keine „eindeutig wahrnehmbaren“ Farbunterschiede erkennbar sind, müssen die eingesetzten LEDs so sortiert sein, dass die aufgespannte Fläche des LED-Binnings kleiner ist als die Abbildung 4.31 dargestellte Fläche nach dem Gocke Vorschlag. Um ein Gefühl für die Größenordnung für die Fläche des Gocke Vorschlags im Vergleich zu einer MacAdam Ellipsen zu haben, ist an dieser Stelle anzumerken, dass der Flächeninhalt nahe zu einer 6-Step MacAdam Ellipse entspricht, sich jedoch von der Neigung unterscheidet.

5 Untersuchungen zur Homogenität von Signallichtfunktionen

5.1 Hauptuntersuchungen am Warmerscheinungsbildsimulator

5.1.1 Ziel der Untersuchungen

Mit Hilfe des Warmerscheinungsbildsimulators (WES) sollen im Rahmen dieser Arbeit künstliche Inhomogenitäten in Heckleuchten, speziell bei der Schlusslichtfunktion, erzeugt werden. Anschließend ist es das Ziel, durch Probandenstudien und photometrische Messungen geeignete Gütekriterien zur Bewertung der Homogenität zu ermitteln und daraus Grenzwerte abzuleiten, die unabhängig von Inhomogenitätsklassen, Leuchtengeometrien, Leuchtenhelligkeiten und Umgebungslichtbedingungen anwendbar sind.

5.1.2 Versuchsaufbau

In Abbildung 5.1 ist schematisch der Aufbau des WESs dargestellt. Das Konzept des WESs basiert auf der Verwendung eines leistungsstarken Projektors in Verbindung mit einem Rückprojektionssystem. Auf Grund der verschiedenen Schnittstellen des Projektors können über die Verknüpfung mit einem Computer Lichtkomponenten auf Basis von berechneten Simulationen oder gängigen Bildformaten (z.B. jpg, bmp, gif) realitätsnah visualisiert werden. Die simulierten Lichtverteilungen können entweder im 16:9 Format auf den 600 mm x 338 mm großen Projektionsschirm oder bei Demontage des Projektionsschirms auf eine ebene Fläche projiziert werden. Letzteres entspricht einer Visualisierung einer Ausleuchtungsfunktion, die jedoch nicht Bestandteil dieser Arbeit ist. Damit kein störendes Fremdlicht die Visualisierung beeinträchtigt und die Probandenbewertung beeinflusst, ist der Projektor des WES durch einen lichtdichten Kasten abgeschottet. Im Zuge der durchgeführten Studien blickten die Probanden, wie im alltäglichen Straßenverkehr, in HV aus der Fahrzeuglängsachse aus einer Entfernung von 4 m auf den Projektionsschirm (vgl. Abschnitt 2.2.2)[42].

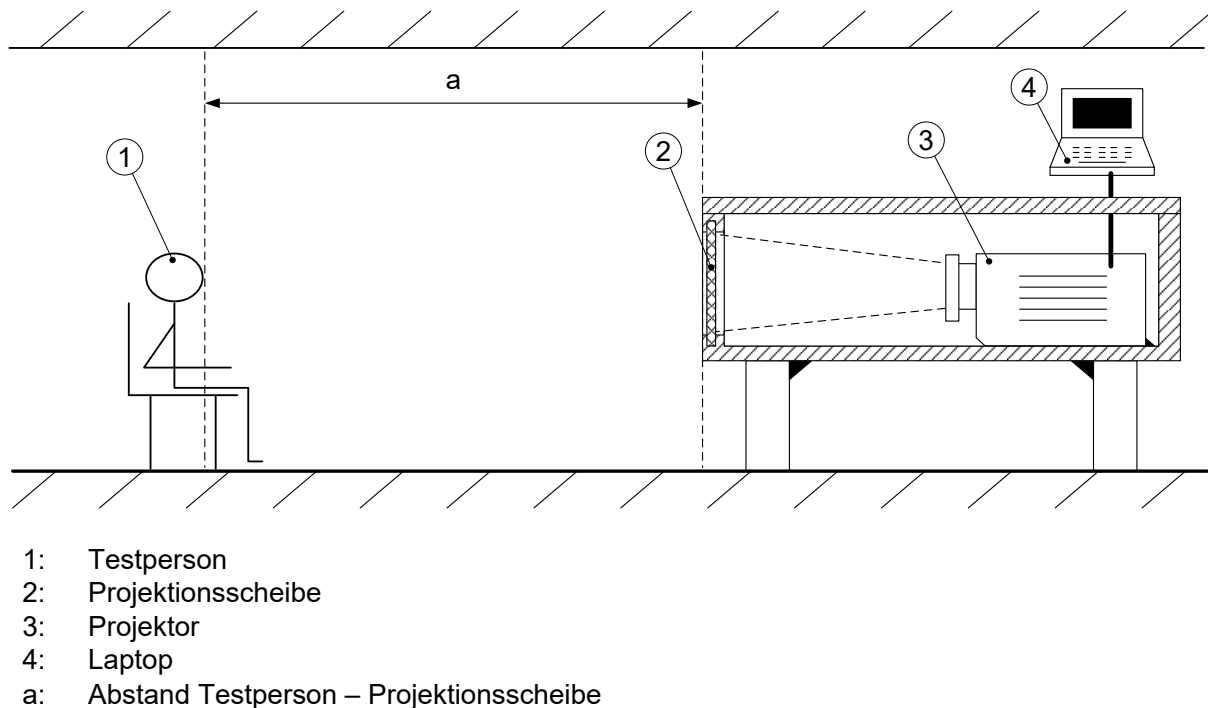


Abbildung 5.1: Schematischer Aufbau des Warmerscheinungsbildsimulators

5.1.3 Erfassung der photometrischen Systemeigenschaften

Die Bestimmung der photometrischen Eigenschaften des Systems erfolgte ortsauflösend mit der bereits in Kapitel 3.4 vorgestellten Leuchtdichtekamera LMK-Color in Verbindung mit der Verwendung eines 50 mm Objektivs. Die Messentfernung zum jeweiligen Objekt beträgt analog zu der Beobachtungsentfernung der Probanden stets 4 m. Im nächsten Schritt wurden innerhalb der ortsauflösenden Aufnahmen manuell Messregionen in der proprietären Software der Kamera definiert. Die manuell bestimmten Messregionen beinhalten ausschließlich die für die zu beobachtenden Lichtfunktion vorgesehenen Flächen. Eine automatisierte Erfassung der Regionen einer Lichtfunktion wurde im Rahmen dieser Arbeit mit Hilfe von verschiedenen Kantendetektionsalgorithmen (Canny und Sobel) und morphologischen Operatoren, wie von Mensch in einer anderen Veröffentlichung vorgeschlagen, geprüft, jedoch sind keine zufriedenstellenden Ergebnisse erzielt worden, da Reflexionen und die vielen Kontraständerungen innerhalb der Leuchte zur Fehldetektionen geführt haben [68].

Nach sorgfältiger Definition der Regionen wurden mit einem für diese Arbeit entwickelten Matlab-Programm verschiedene erforderliche Kennwerte zur Berechnung eines Homogenitätskriteriums (z.B. Maximum, Median, Mittelwert, Schwerpunkte, Visibility Level) bestimmt, so dass die Gütekriterien GK_1 - GK_{12} berechnet werden konnten.

Der dargestellte Prozess der Erfassung der photometrischen Daten gilt nicht nur für die Untersuchungen mit dem Warmerscheinungsbildsimulator, sondern wird auch analog in den weiteren Validierungsuntersuchungen in Abschnitt 5.2 und 5.3 angewendet.

5.1.4 Bewertung der photometrischen Systemeigenschaften

Der Dynamikumfang der mittleren Leuchtdichte zwischen einem schwarzen und einem vollständig weiß ausgeleuchteten Projektionsschirm liegt in einem Bereich zwischen 0,1 bis 9000 cd/m^2 . Bei einer Ausleuchtung in roter Farbe reduziert sich der Maximalwert der Leuchtdichte auf 2000 cd/m^2 . Messungen von realen Schlussleuchten zeigen jedoch, dass an einigen inhomogenen Stellen (z.B. Einkoppelstellen) weitaus höhere Leuchtdichten vorzufinden sind. Bei der Verwendung des WESs muss daher berücksichtigt werden, dass nicht jede Inhomogenität simulativ dargestellt werden kann. Da Schlussleuchten aus der Serienproduktion eine mittlere Leuchtdichte von 270 bis 1500 cd/m^2 aufweisen, ist dennoch eine realitätsnahe Visualisierung, insbesondere im Hinblick auf die mittlere Helligkeit, gegeben (vgl. Abbildung 5.21).

5.1.5 Simulative Nachbildung von Schlussleuchten

Für eine qualitative Bewertung der verschiedenen Inhomogenitätsklassen ist es erforderlich, diese realitätsnah mit dem WES zu visualisieren. Durch die Schnittstelle zu einem Computer bietet sich die Möglichkeit, jede erdenkliche Inhomogenität darzustellen. Im Rahmen dieser Arbeit wird die Einschränkung gemacht, dass bei den WES-Versuchen ausschließlich die lokalen Inhomogenitätsklassen Einkoppelstellen und Verläufe untersucht werden. Zudem werden bei den Einkoppelstellen und den Verläufen zusätzliche Untersuchungen mit einer überlagerten Struktur (STRUK) durchgeführt. So kann der Einfluss einer Prismenstruktur auf die Homogenitätsbewertung bestimmt werden. Um globale Inhomogenitäten bewerten zu können, werden Darstellungen generiert, bei denen Teilflächen in sich homogen sind, aber zueinander unterschiedliche mittlere Leuchtdichten aufweisen. Damit die Probanden im Rahmen der Versuche eine gute Referenz bewerten können, wird auch eine homogene Schlussleuchte in verschiedenen Helligkeiten (HOMOGEN) simuliert.

Die technische Realisierung von künstlich generierten Inhomogenitäten wird in Abbildung 5.2 mit dem dargestellten Digitalisierungsprozess veranschaulicht.

Im ersten Schritt erfolgt eine ortsauflösende Leuchtdichtevermessung einer möglichst homogenen Referenzleuchte. Im Zuge dieser Arbeit wird hierfür die BMW 5er Schlussleuchte aus dem Baujahr 2011 verwendet. Das Schlusslicht besteht aus sechs leuchtenden Teilflächen und weist das für BMW typische L-förmige Design auf.

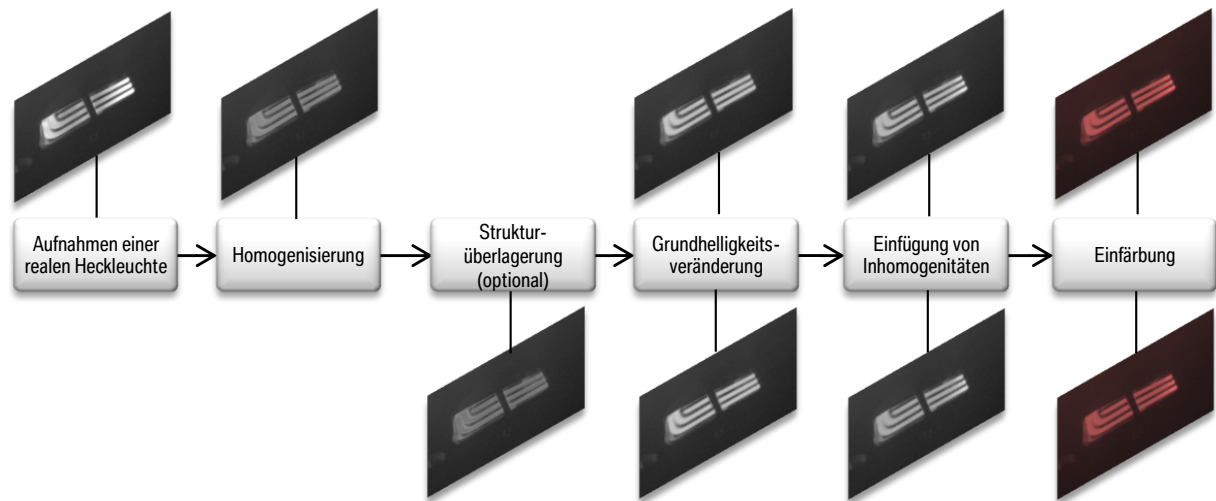


Abbildung 5.2: Digitalisierungsprozess von simulierten Inhomogenitäten

Mit Hilfe der Auswertungssoftware kann die ortsauflösende Leuchtdichtemessung in eine Graustufendarstellung überführt werden, welche mit Bildverarbeitungsprogrammen bearbeitet werden kann. Im nächsten Prozessschritt erfolgt eine Homogenisierung der leuchtenden Signalflächen, bei der Inhomogenitäten wie zum Beispiel Einkoppelstellen eliminiert werden. Dieses Bild stellt die Grundebene für alle nachgestellten Inhomogenitäten dar. Optional wird im nächsten Schritt das homogenisierte Referenzbild mit einer gleichmäßigen Struktur überlagert. Die Struktur besteht aus senkrechten Linien mit einem gleichbleibenden Abstand. Ausgehend von dem Referenzbild mit oder ohne Struktur wird die Grundhelligkeit der leuchtenden Flächen angepasst. So kann die Auswirkung des lokalen Adaptationsniveaus auf die Homogenitätsbewertung berücksichtigt werden.

Im vorletzten Prozessschritt werden die Inhomogenitätsmuster mit dem helligkeitsangepassten Referenzbild überlagert. Für eine realitätsnahe Darstellung der Einkoppelstellen werden hierfür die zuvor aus dem Graustufenbild der Leuchtdichteaufnahme extrahierten Einkoppelstellen verwendet. Die Verläufe und unterschiedlichen Helligkeiten eines einzelnen Elements werden synthetisch mit einem Bildbearbeitungsprogramm erstellt.

Um einen Grenzwert für die Homogenitätsbewertung ermitteln zu können, wird jedes Inhomogenitätsmuster in zehn verschiedene Helligkeitsstufen ($\ddot{U}H=10\%, 20\%, 25\%, 30\%, 35\%, 40\%, 50\%, 60\%, 80\%$ und 100%) visualisiert, indem die Helligkeitsstufen der Inhomogenitäten mit der Grundhelligkeit im Bildverarbeitungsprogramm überlagert werden. Die resultierende Leuchtdichte der Inhomogenitäten und die Helligkeitsstufen stehen über eine Potenzfunktion im Zusammenhang (vgl. Abbildung 5.3, Formel 5.1 und Tabelle 5.1).

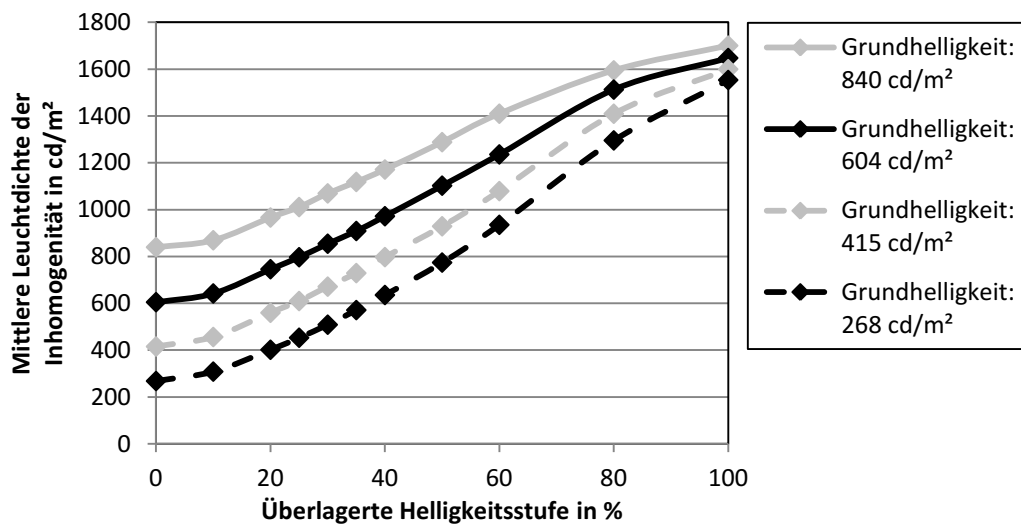


Abbildung 5.3: Zusammenhang zwischen den prozentualen Grundhelligkeiten und der resultierenden Leuchtdichte des WES

$$\begin{aligned} \bar{L}(GH, \ddot{U}H) = & a_0 + a_1 \cdot GH + a_2 \cdot \ddot{U}H + a_3 \cdot GH^2 + a_4 \cdot GH \cdot \ddot{U}H + a_5 \cdot \ddot{U}H^2 \\ & + a_6 \cdot GH^2 \cdot \ddot{U}H + a_7 \cdot GH \cdot \ddot{U}H^2 + a_8 \cdot \ddot{U}H^3 \end{aligned} \quad (5.1)$$

Tabelle 5.1: Konstanten des WES-Helligkeitsmodells

$a_0 = -100$	$a_1 = 6,337$	$a_2 = 1,41$
$a_3 = 0,0897$	$a_4 = 0,006729$	$a_5 = -0,0007798$
$a_6 = -0,000141$	$a_7 = 1,296e-006$	$a_8 = 3,093e-6$

Im letzten Schritt des Digitalisierungsprozesses muss für die Darstellung eines Schlusslichts das Graustufenbild rot eingefärbt werden. Hierfür gibt es zwei Lösungsansätze. Ein Lösungsansatz besteht darin, vor dem WES eine zusätzliche rote Scheibe zu installieren. Dies bietet den Vorteil, dass der Kontrastumfang aufgrund der Verwendung aller RGB-Kanäle feiner justiert werden kann. Jedoch zieht diese Lösung den Nachteil mit sich, dass aufgrund der zusätzlichen Scheibe störende Doppelbilder entstehen. Daher wird im letzten Prozessschritt trotz eines geringeren Dynamikumfangs das resultierende Graustufenbild der simulierten Schlussleuchten mit dem Bildverarbeitungsprogramm in roter Farbe eingefärbt.

Mit dem beschriebenen Verfahren sind insgesamt 170 inhomogene sowie acht homogene Musterleuchten aufbereitet worden. Die Inhomogenitätsbeispiele für die Einkoppelstellen EK01 sind in vier Untergruppen a bis d unterteilt. Die Untergruppen unterscheiden sich insofern, als dass bei einer gleichen Inhomogenität unterschiedliche Grundhelligkeiten von 268 cd/m² bis 840 cd/m² berücksichtigt werden. Analog hierzu werden die Klassen ELEMENT und HOMOGEN ebenfalls in Untergruppen mit jeweils vier Grundhelligkeiten von (268 cd/m², 415

cd/m^2 , $605 \text{ cd}/\text{m}^2$, $840 \text{ cd}/\text{m}^2$ unterteilt. Die übrigen simulierten Inhomogenitätsklassen VerL01-04, EK02-EK03, EK01-STRUK, EK03-STRUK und VERL01-STRUK besitzen eine Grundhelligkeit von $507 \text{ cd}/\text{m}^2$.

Zur Veranschaulichung der Inhomogenitätsmuster sind ausgewählte Beispiele in Form von farb- und ortsauflösenden Leuchtdichteaufnahmen in Abbildung 5.4 dargestellt. Eine Übersicht aller Inhomogenitätsmuster mit der höchsten Kontraststufe ist im Anhang unter E.2 hinterlegt. Eine Übersicht der qualitativen Eigenschaften der Inhomogenitätsmuster ist in Tabelle 5.2 aufgelistet.

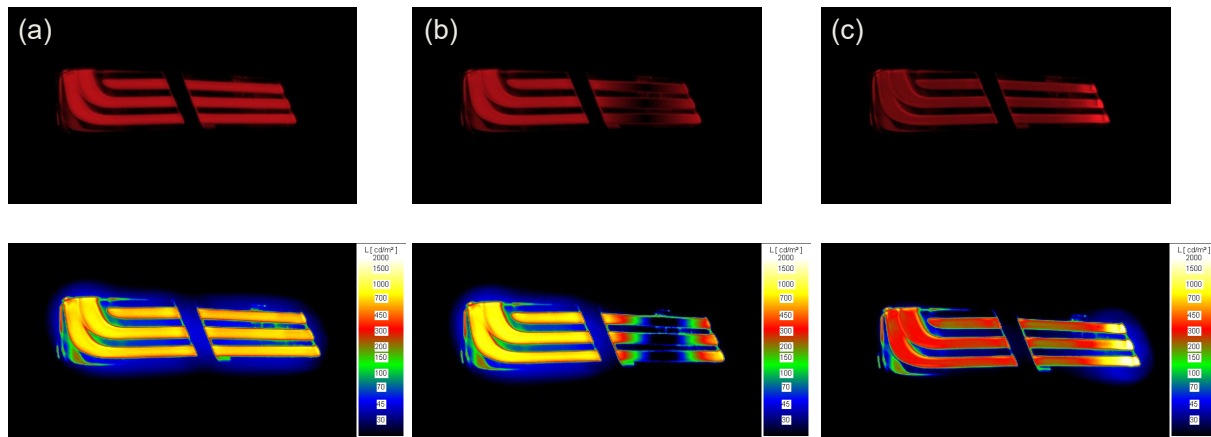


Abbildung 5.4: Inhomogenitätsmuster der WES Versuche: (a) Homogen (HOMOGEN03), (b) Verlauf (VERL04), (c) helle Einkoppelstelle (EK01 a)

Für eine Übersicht der quantitativen Eigenschaften der Inhomogenitätsklassen ist in Tabelle 5.2 unter anderem die mittlere Leuchtdichte aller Elemente der simulierten Heckleuchte im Zusammenhang mit der Grundhelligkeit dargestellt.

Tabelle 5.2: Auflistung und Beschreibung der Inhomogenitätsmuster der WES Versuche

SP	Bez.	Beschreibung	GH	ÜH
Einkoppelstellen	EK01 a	3 helle Einkoppelstellen rechts	$268 \text{ cd}/\text{m}^2$	10-100 %
	EK01 b	3 helle Einkoppelstellen rechts	$415 \text{ cd}/\text{m}^2$	10-100 %
	EK01 c	3 helle Einkoppelstellen rechts	$605 \text{ cd}/\text{m}^2$	10-100 %
	EK01 d	3 helle Einkoppelstellen rechts	$840 \text{ cd}/\text{m}^2$	10-100 %
	EK02	3 helle Einkoppelstellen rechts	$507 \text{ cd}/\text{m}^2$	10-100 %
	EK03	2 helle Einkoppelstellen links	$507 \text{ cd}/\text{m}^2$	10-100 %
Einkoppelstellen und Lichtleiterstruktur	EK01-STRUK	3 helle Einkoppelstellen rechts (analog EK01) auf strukturiertem Hintergrund	$507 \text{ cd}/\text{m}^2$	10-100 %

Fortsetzung auf der nächsten Seite ...

SP	Bez.	Beschreibung	GH	ÜH
<i>...Fortsetzung der Tabelle</i>				
	EK03-STRUK	2 helle Einkoppelstellen links (analog EK03) auf strukturiertem Hintergrund	507 cd/m ²	10-100 %
Verläufe	VERL01	Heller Verlauf von rechts nach links	507 cd/m ²	10-100 %
	VERL02	Heller zweiseitiger Verlauf	507 cd/m ²	10-100 %
	VERL03	Heller Verlauf von links nach rechts	507 cd/m ²	10-100 %
	VERL04	Dunkler Verlauf in der Mitte der rechten Seite	664 cd/m ²	10-100 %
Verläufe und Lichtleiterstruktur	VERL01-STRUK	Verlauf von rechts nach links (analog VERL01) auf strukturiertem Hintergrund	507 cd/m ²	10-100 %
Unterschiedliche Helligkeiten einzelner Elemente	ELEMENT01 a	1 Element heller als die Übrigen	268 cd/m ²	10-100 %
	ELEMENT01 b	1 Element heller als die Übrigen	415 cd/m ²	10-100 %
	ELEMENT01 c	1 Element heller als die Übrigen	605 cd/m ²	10-100 %
	ELEMENT01 d	1 Element heller als die Übrigen	840 cd/m ²	10-100 %
Homogene Beispiele	HOMOGEN01 a	Homogene Leuchte	268 cd/m ²	-
	HOMOGEN01 b	Homogene Leuchte	415 cd/m ²	-
	HOMOGEN01 c	Homogene Leuchte	605 cd/m ²	-
	HOMOGEN01 d	Homogene Leuchte	840 cd/m ²	-

5.1.6 Versuchsprotokoll und –durchführung

Mit Hilfe des WES wurden im Zuge einer Diplomarbeit von Schreier über 6.200 Probandenergebnisse zur Empfindung von Inhomogenitäten an einer simulierten und auf einem Projektionschirm dargestellten BMW 5er Heckleuchte bei einer konstanten Umgebungshelligkeit von $L_B = 0,01 \text{ cd/m}^2$ ermittelt [101].

Die geometrische Form der simulierten Heckleuchten bleibt während des gesamten Versuchs konstant. Dem Proband werden insgesamt 203 Beispiele in zufälliger Reihenfolge dargeboten. Die Darbietungsreihenfolge ist für jeden Proband identisch. Damit der Proband sich mit der Fragestellung vertraut machen kann, beinhalten die 203 Beispiele 25 Trainingsmuster, die Beispiele aus allen Inhomogenitätsklassen umfassen.

Analog zu den vorherigen Versuchen zur farblichen Homogenitätsbewertung wird in den Versuchen zur Homogenität im Hinblick auf die Helligkeit ebenfalls eine 3+1 Skalentiefe gewählt. Während des Versuchs soll sich der Proband seine Situation so vorstellen, dass er während der Rotphase an einer Ampel in seinem Fahrzeug sitzend die Heckleuchte des voranstehenden Fahrzeugs beobachtet. Für die Ermittlung der Homogenitätsbewertung wird der Proband mit folgender Fragestellung konfrontiert:

Wie bewerten Sie die Homogenität der Schlussleuchte?

Die Antworten erfolgten gemäß Tabelle 5.3.

Tabelle 5.3: Bewertungsstufen zur Homogenitätswahrnehmung

Inhomogenitäten sind:			
1	2	3	4
nicht wahrnehmbar	gerade wahrnehmbar	eindeutig wahrnehmbar	nicht akzeptabel

Tabelle 5.4: Zusammenstellung der Rahmenbedingungen der WES-Versuche

Rahmenbedingungen zu den WES-Versuchen	
Anzahl Inhomogenitätsmuster	170 Stück
Anzahl homogener Beispiele	8 Stück
Anzahl Übungsbeispiele	25 Stück
Form/Kontur der Nachbildung	Schlussleuchte eines BMW 5ers
Maximale Leuchtdichte	ca. 2 100 cd/m ²
Umgebungsleuchtdichte	≈ 0,01 cd/m ²
Blickrichtung der Testpersonen	HV
Dauer des Versuches	20 – 30 Minuten
Anzahl Versuchspersonen	31
Geschlechteraufteilung	25 (m) und 6 (w)
Altersgruppe der Probanden	20 – 58 Jahre
Durchschnittsalter	24 Jahre

An dem Versuch nahmen insgesamt 31 Personen teil. Für den Teilnehmerkreis gelten dieselben Randbemerkungen wie in den vorherigen Versuchen (siehe Abschnitt 4.1.5). Eine Farbfehlsichtigkeit stellt nun jedoch kein Ausschlusskriterium dar. Abschließend sind die Rahmenbedingungen der WES-Versuche in Tabelle 5.4 dargestellt.

5.1.7 Vorstellung der Ergebnisse

Anhand des Histogramms in Abbildung 5.5 wird veranschaulicht, dass mit den technischen Rahmenbedingungen des WES die Simulation von homogenen und inhomogenen Heckleuchten möglich ist. Dazu ist die Häufigkeit der Mittelwerte der 178 dargebotenen Inhomogenitäten über alle Probanden in vier Kategorien gemäß den Antwortmöglichkeiten aufgeschlüsselt. Die Verteilung zeigt, dass das Versuchskollektiv hinsichtlich einer Grenzwertbestimmung richtig ausgewählt ist, da sowohl Bewertungen mit der Stufe 1 als auch mit Stufe 4 vorzufinden sind. Der Schwerpunkt der Häufigkeiten liegt direkt im kritischen Bereich um die Bewertungsstufe eine Inhomogenität ist „3 - deutlich wahrnehmbar“.

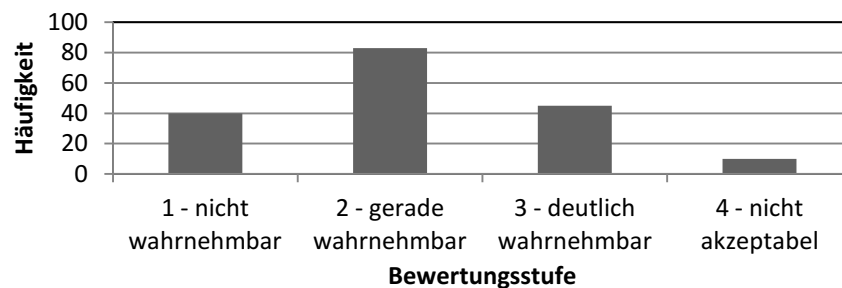


Abbildung 5.5: Histogramm des Mittelwerts der Probandenauswertung für die 178 Darbietungsszenarien aus den WES-Versuchen

Auch wenn das Histogramm bereits zeigt, dass über das gesamte Versuchskollektiv homogene Bewertungen vorzufinden sind, ist für das Verständnis des Versuchs wichtig, zu analysieren, ob die von den Experten als homogen prognostizierten Beispiele ebenfalls von den Probanden als homogen bewertet werden. Mit Abbildung 5.6 kann gezeigt werden, dass die homogenen Beispiele von den Probanden allesamt als homogen bewertet werden.

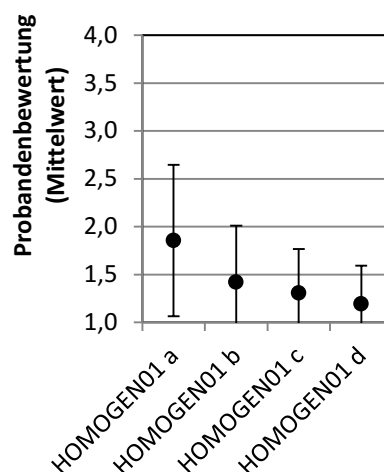
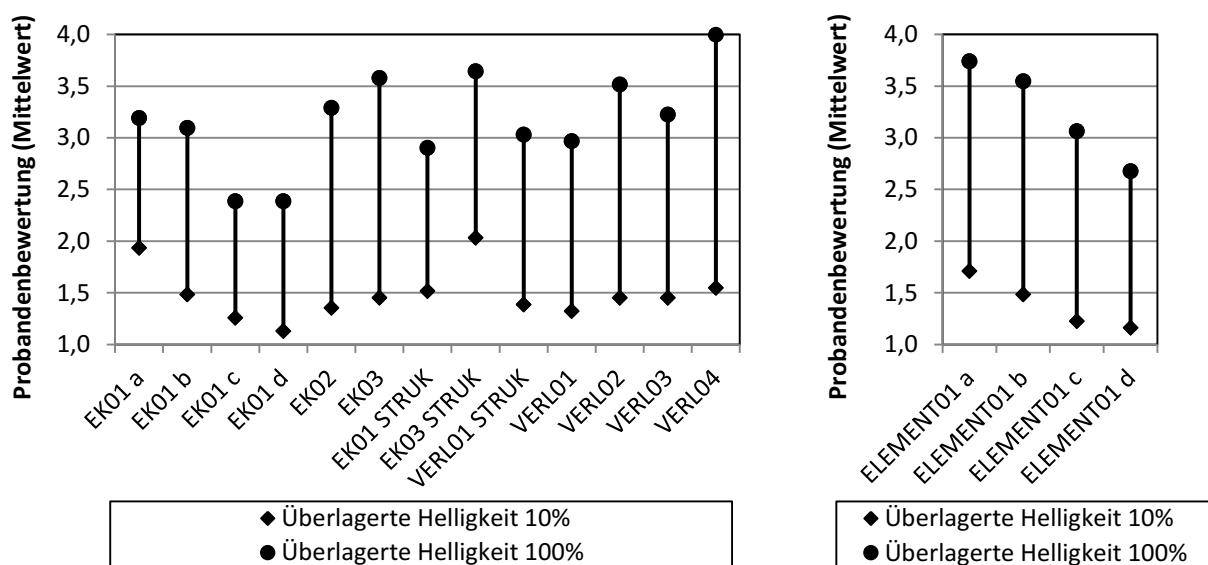


Abbildung 5.6: Mittlere Probandenauswertung der Klasse „Homogen“

Da die Generierung des homogenen Beispiels aus dem Leuchtdichtebild der nicht vollkommen homogenen BMW 5er Heckleuchten erfolgt, liegt die mittlere Probandenbewertung beim zuvor genannten Beispiel mit einer mittleren Leuchtdichte von 268 cd/m^2 bereits bei einer mittleren Probandenbewertung von 1,9. Mögliche kleine lokale Maxima werden aus Gründen einer späteren realistischen Darstellung von Inhomogenitäten in Kauf genommen. Aus technischen Gründen verringert sich mit der Zunahme der Grundhelligkeit der maximal darstellbare Weber-Kontrast des WES (siehe Abbildung 5.3). Daher werden die Beispiele mit einer höheren Grundhelligkeit von den Probanden homogener empfunden als die Beispiele mit einer niedrigen Grundhelligkeit (siehe Abbildung 5.3). Übergreifend kann für alle simulierten Inhomogenitätsklassen festgestellt werden, dass mit einer Erhöhung der überlagerten Helligkeitsstufe der Weber-Kontrast vergrößert wird und infolgedessen eine Verschlechterung der Probandenbewertung in Richtung einer inakzeptablen Inhomogenität einhergeht.



(a) Lokale Inhomogenitäten

(b) Globale Inhomogenitäten

Abbildung 5.7: Mittelwert der Probandenbewertung für die niedrigste und höchste überlagerte Helligkeitsstufe (10% und 100%) der WES-Untersuchungen

In den Abbildungen 5.7(a) und (b) sind getrennt voneinander die Ergebnisse der Probandenstudie mit dem Warmerscheinungsbildsimulator für die lokalen und globalen Inhomogenitätsklassen dargestellt. Hierfür werden separat für jede simulierte Inhomogenitätsklasse die mittleren Probandenbewertungen gezeigt, welche sich durch die Darbietung von minimalen und maximalen Inhomogenitätsausprägungen (d.h. die im Bildverarbeitungsprogramm additiv überlagerte Helligkeitsebene besitzt einen Wert von 10% oder 100%) ergeben.

Durch Abbildung 5.7 wird belegt, dass die simulative Darstellung von Inhomogenitäten mit dem WES möglich ist, da mittlere Probandenbewertungen in einer Stufe „3 - deutlich wahrnehmbar“ und höher bei mehreren Inhomogenitätsklassen vorzufinden sind.

Obwohl die technischen Rahmenbedingung bei einer gegebenen Grundhelligkeit nur einen maximalen Weber-Kontrast zulassen, besitzen die verschiedenen Inhomogenitätsklassen unterschiedliche hohe mittlere Probandenbewertungen bei einem ÜH-Wert von 100%. Ein Vergleich der mittleren Probandenbewertungen mit einem ÜH-Wert von 100% zwischen der globalen Inhomogenitätsklasse ELEMENT01 und der lokalen Inhomogenitätsklasse EK01 zeigt, dass die lokalen Inhomogenitäten in Form einer Einkoppelstelle im Gegensatz zu globalen Inhomogenitäten in Form eines helleren Elements als deutlich homogener bewertet werden, obgleich technisch dieselben Parameter im Bildverarbeitungsprogramm angewendet wurden. Somit kann die These aufgestellt werden, dass nicht nur der Kontrast, sondern auch die Form und die Größe einer Inhomogenität einen Einfluss auf die Probandenbewertung nimmt. Obwohl sich die mittleren Probandenbewertungen zwischen EK03 und EK03-STRUK (3,58 zu 3,63 - Überlagerte Helligkeit 100%) sowie zwischen VERL01 und VERL01-STRUK (3,03 und 2,97 - Überlagerte Helligkeit 100%) nur geringfügig unterscheiden, werden die Probandenbewertung durch eine Struktur signifikant beeinflusst (siehe Anhang E.3). Durch die Ergebnisse der lokalen Inhomogenitätsklassen VERL wird verdeutlicht, dass sich die Art eines Verlaufs auf die Homogenitätsbewertung auswirkt.

5.1.8 Korrelationsanalyse

Da die Leuchtdichteunterschiede der jeweils generierten Inhomogenitäten nicht nur von der überlagerten Helligkeitsstufe, sondern auch von der Grundhelligkeit und der Form abhängen, können die Ergebnisse der verschiedenen Klassen auch bei gleicher Ausprägung der Inhomogenität nicht ohne Weiteres miteinander verglichen werden.

Daher wird in den folgenden Abschnitten der Zusammenhang zwischen den subjektiven Probandenbewertungen und den in Kapitel 3.4 vorgestellten objektiven, photometrischen Gütekriterien GK_1 bis GK_{12} durch eine Korrelation der Ergebnisse hergestellt.

Die Visualisierung der Ergebnisse erfolgt in zweidimensionalen Diagrammen, in denen sich eine Punktkoordinate aus der mittleren Probandenbewertung (y-Achse) sowie aus der Kennzahl des jeweiligen Gütekriteriums (x-Achse) GK_1 bis GK_{12} ergibt. Zusätzlich wird jedem Punkt die Standardabweichung in positiver und negativer Richtung hinzugefügt. Mit Hilfe einer Ausgleichskurve ist es möglich, die Güte einer Korrelation zu bewerten. Als Bewertungsmaßstab dient dazu das Bestimmtheitsmaß R^2 . Daher ist in allen Diagrammen der Korrelationsanalyse zusätzlich eine lineare Regressionsgerade eingefügt, deren Bestimmtheitsmaß R^2 und Formel im Diagramm dokumentiert ist. Das Bestimmtheitsmaß R^2 kann Werte zwischen 0 und 1 annehmen und ist ein Indikator, wie viel Prozent der realen Streuung durch die Regression korrekt prädictiert werden [62].

Die Korrelation der Ergebnisse erfolgt sowohl separat für jede lokale Inhomogenitätsklasse (EK01a, EK01b, EK01c, EK01d, usw.) als auch übergreifend für alle lokalen Inhomogenitätsklas-

sen. Um die Auswirkungen von großflächigen Inhomogenitäten (Element) bewerten zu können, werden, wie in Kapitel 3.2 erläutert, die photometrischen Gütekriterien „lokal“, „global“ und „lokal oder global“ ausgewertet. Für die globalen Inhomogenitäten Element01 a - d erfolgt ausschließlich eine globale Auswertung der Gütekriterien, da die Elemente in sich homogen sind.

Zur Veranschaulichung ist in Abbildung 5.8 die Korrelationsanalyse aller dargebotenen lokalen Inhomogenitäten der WES-Untersuchungen (alle außer Element01a - d) für das Gütekriterium GK_8 dargestellt. In Anhang E.4.1 sind weitere Darstellungen für die jeweiligen Inhomogenitätsklassen der WES-Untersuchungen zu finden.

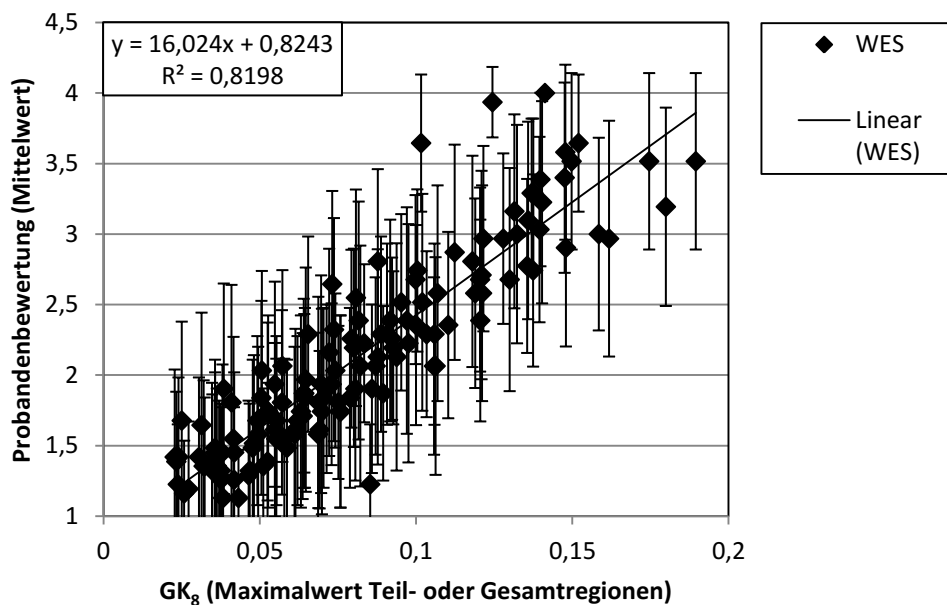


Abbildung 5.8: Korrelationsanalyse WES: Nur lokale Inhomogenitätsklassen mit GK_8

5.1.8.1 Lokale Inhomogenitäten

Das Ergebnis der Korrelation über alle mit dem WES dargebotenen lokalen Inhomogenitäten ist in Abbildung 5.9 dargestellt. Hierzu ist auf der x-Achse das jeweilige Gütekriterium GK_1 bis GK_{12} und auf der y-Achse das Bestimmtheitsmaß R^2 aufgetragen. Die Ergebnisse sind getrennt für die Auswertungsformen „lokal“, „global“ und „lokal oder global“ aufgeschlüsselt.

Bei der Betrachtung der verschiedenen Auswertungsformen in Abbildung 5.9 zeigt sich generell, dass durch die Verknüpfung der lokalen sowie der globalen Bewertungsform bei einer Vielzahl der vorgestellten Gütekriterien eine Verbesserung des Bestimmtheitsmaßes erzielt werden konnte. Für das Verständnis der subjektiven Inhomogenitätsbewertung bedeutet dies, dass der Mensch eine Inhomogenität sowohl in einem lokalen als auch in einem globalen Kontext bewertet.

Anhand der Abbildung 5.9 zeigt sich, dass eine Vielzahl der verwendeten Gütekriterien eine hohe Korrelation zwischen den subjektiven Probandenbewertungen und den objektiven photometrischen Kenngrößen aufweist. Die höchsten Kennzahlen des Bestimmtheitsmaßes weisen das Gütekriterium GK_1 ($R^2 = 0,75$), GK_5 ($R^2 = 0,73$) und GK_8 ($R^2 = 0,82$) auf. Am wenigsten geeignet sind die Gütekriterien GK_{10} - GK_{12} , welche auf der Verwendung von Kontrastschwellenmodellen basieren. Die extremwertbasierten Gütekriterien GK_2 - GK_4 sind genauso für die Verwendung zur objektivierten Bewertung geeignet, da diese Kriterium sehr stark von den Kameraparametern, der Aufnahmeentfernung und Leuchtentechnologie abhängen. Das von Mensch und von der DIN vorgeschlagene Gütekriterium GK_7 auf Basis der Streuungsparameter weist genauso wenig ein hohes Bestimmtheitsmaß auf und wird daher nicht für die Bewertung der Homogenität weiterempfohlen.

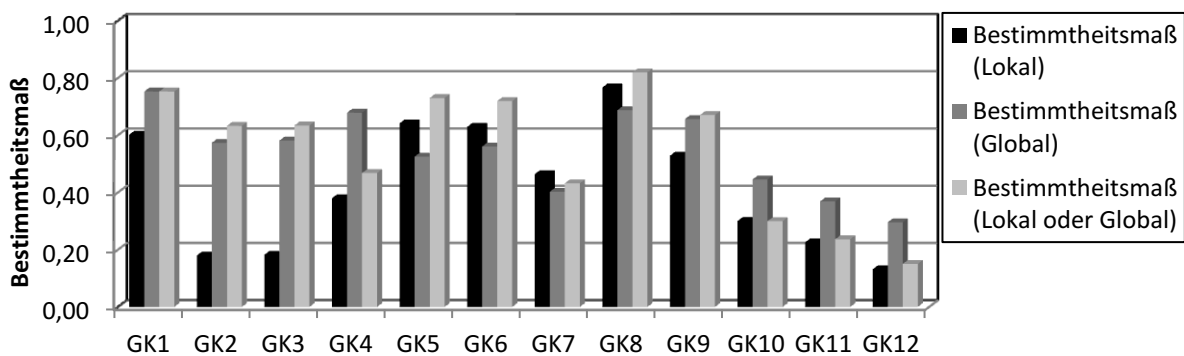


Abbildung 5.9: Bestimmtheitsmaß WES: Nur lokale Inhomogenitätsklassen

Bei der separaten Regressionsanalyse mit einzelnen Inhomogenitätsklassen können die zuvor genannten Aussagen zu der Rangfolge der Gütekriterien bestätigt werden. Es kann zudem festgestellt werden, dass noch bessere Bestimmtheitsmaße mit Werten größer als $R^2 = 0,98$

erzielt werden können (siehe Abbildung 5.10 und in den Tabellen E.2, E.3 und E.4 in Anhang E.4).

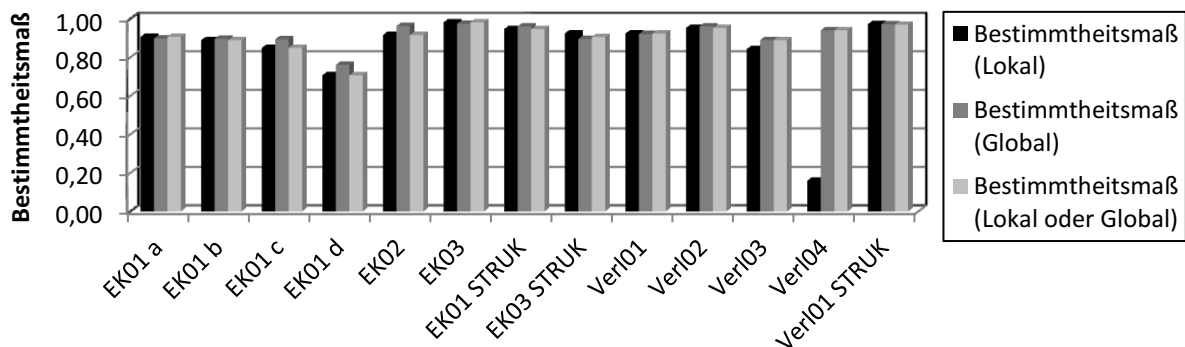
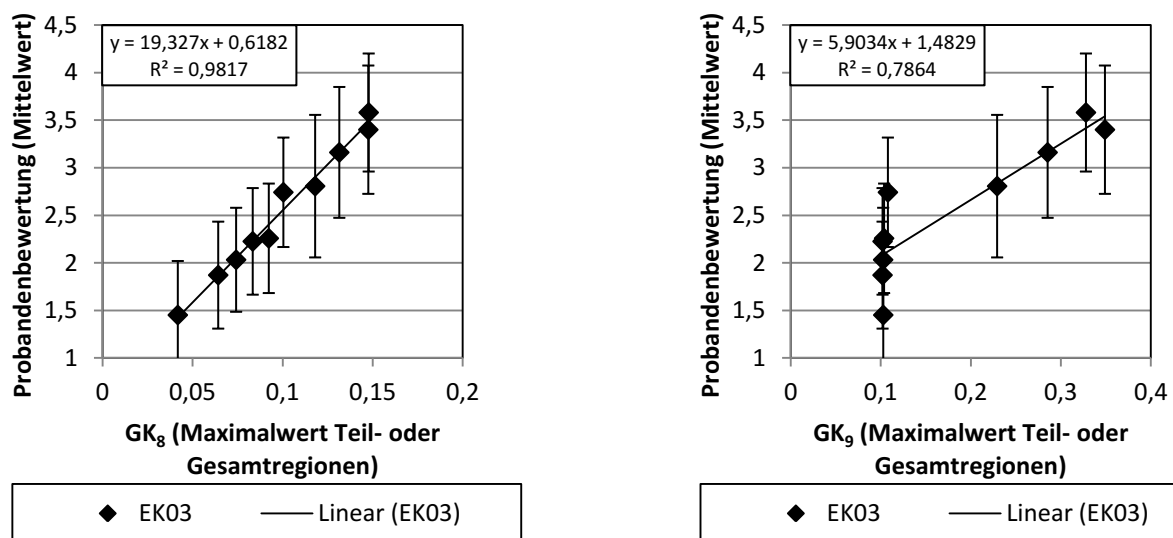


Abbildung 5.10: Bestimmtheitsmaß WES: Separate Analyse der lokalen Inhomogenitätsklassen mit dem Gütekriterium GK_8

Doch das Bestimmtheitsmaß allein sollte kein Entscheidungsgrund zur Auswahl eines geeigneten Gütekriteriums für die Homogenitätsbewertung sein. Diese Aussage kann am Beispiel der Abbildung 5.11 bestätigt werden, in dem die Korrelation der Ergebnisse der Inhomogenitätsklasse EK03 unter der Verwendung der Gütekriterien GK_8 und GK_9 veranschaulicht wird.



(a) Korrelationsanalyse WES: Inhomogenitätsklasse EK03 Gütekriterium GK_8

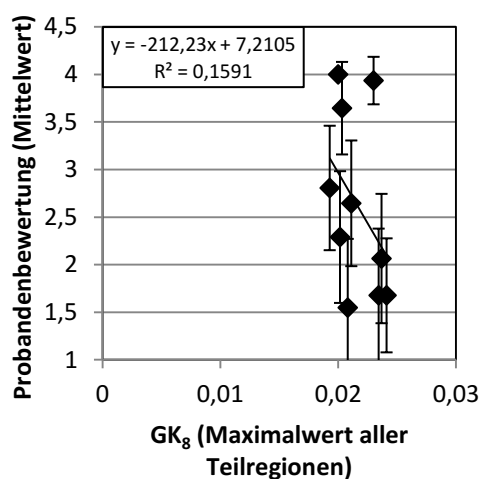
(b) Korrelationsanalyse WES: Inhomogenitätsklasse EK03 Gütekriterium GK_9

Abbildung 5.11: Korrelationsanalyse WES: Inhomogenitätsklasse EK03 Gütekriterien GK_8 und GK_9

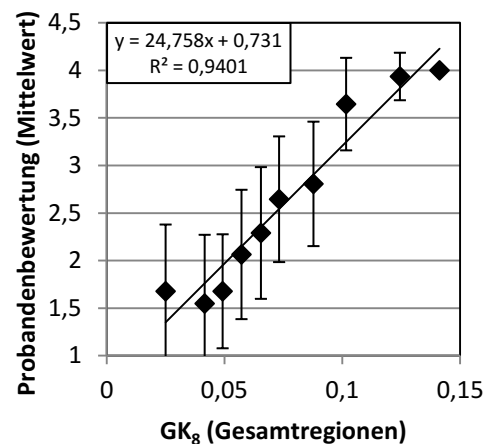
Beide Gütekriterien weisen ein hohes Bestimmtheitsmaß auf. Jedoch zeigt sich bei der Regressionsanalyse mit GK_9 , dass dieses Kriterium weniger gut geeignet ist. Es fällt auf, dass

die Steigung für GK_9 in Abbildung 5.11(b) nur durch vier Datenpunkte bestimmt wird und dem Gütekriterium GK_9 für den Zahlenwert 0,11 mehrere mittlere Probandenbewertungen zugeordnet werden können. Da diese Anmerkung bei dem Gütekriterium GK_8 nicht zutreffen, ist dieses Kriterium für die Inhomogenitätsbewertung geeignet. Diese beschriebene visuelle Überprüfung wurde für alle Gütekriterien, insbesondere bei den Gütekriterien GK_1 , GK_5 und GK_8 , bei allen Inhomogenitätsklassen durchgeführt. Daher sind die Kriterien für die Bewertung der simulativ erzeugten Inhomogenitäten geeignet.

Nach den Ergebnissen der Regressionsanalyse ist das Gütekriterium GK_8 auf Basis der Schwerpunktmethodemethode am besten für die objektivierte Bewertung der Homogenität geeignet. Dies wird im weiteren Verlauf der Arbeit kritisch hinterfragt. Auf Grund des Konzepts des schwerpunkt-basierten Gütekriteriums GK_8 können symmetrische Inhomogenitäten zu einem geringeren Bestimmtheitsmaß führen (siehe Abbildung 5.10). Symmetrische Inhomogenitäten können z.B. durch eine zweiseitige Einspeisung des Lichts in einem Lichtleiter entstehen und werden in den WES-Versuchen durch die Klasse Ver104 simulativ dargestellt. Das Ergebnis der Korrelation der Probandenbewertungen mit den photometrischen Gütekriterien ist in Abbildung 5.12(a) auf Basis einer reinen lokalen Bewertung des inhomogensten Lichtleiters dargestellt.



(a) Korrelationsanalyse WES: Inhomogenitätsklasse Ver104 Gütekriterium GK_8 max



(b) Korrelationsanalyse WES: Inhomogenitätsklasse Ver104 Gütekriterium GK_8 global

Abbildung 5.12: Korrelationsanalyse WES: Inhomogenitätsklasse Ver104, Gütekriterien GK_8 max und global

Anhand von Abbildung 5.12(a) ist ersichtlich, dass das Bestimmtheitsmaß R^2 mit einem Wert von 0,1591 sehr schlecht ist. Somit kann ausschließlich auf Basis einer lokalen Bewertung keine robuste Aussage zur Homogenität erfolgen. Dem gegenübergestellt ist in Abbildung 5.12(b) die Korrelationsanalyse der Klasse Ver104 für eine globale Bewertung der gesamten Leuchte. Es zeigt

sich, dass mit Hilfe einer globalen Bewertung ein sehr hohes Bestimmtheitsmaß von $R^2=0,9401$ erzielt wird. Die objektivierte Bewertung von symmetrischen Inhomogenitäten ist somit mit dem Gütekriterium GK_8 unter der Voraussetzung einer globalen Bewertung möglich.

5.1.8.2 Globale Inhomogenitäten

Für die Ermittlung eines geeigneten Gütekriteriums zur Bewertung von globalen Inhomogenitäten wird eine Korrelation der mittleren Probandenbewertung der Inhomogenitätsklasse Element01 a - d mit allen in Kapitel 3.4 vorgestellten Kriterien nur unter der Verwendung der globalen Bewertungsebene durchgeführt. Hierfür werden alle Teilregionen zu einer Gesamtregion zusammengefasst und gesamthaft ausgewertet. Als Ergebnis ist hierfür in Abbildung 5.13 das Bestimmtheitsmaß aller Gütekriterien für eine globale Bewertung dargestellt.

Zwar besitzt das Kriterium GK_8 ein sehr hohes Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,81$, jedoch gibt es mit GK_4 und GK_9 zwei weitere Kriterien, die geringfügig einen höheren Kennwert aufweisen (beide $R^2 = 0,83$). In Abbildung 5.13 zeigt sich, dass die zuvor verwendeten Kriterien GK_1 und GK_5 weniger gut für die Bewertung von globalen Inhomogenitäten geeignet sind.

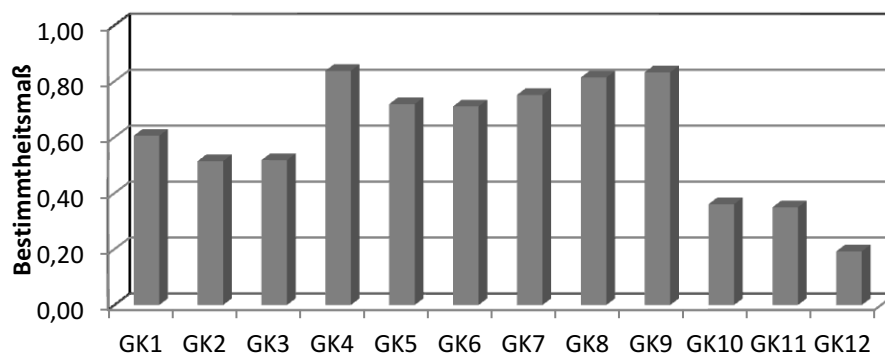


Abbildung 5.13: Bestimmtheitsmaß WES: Globale Inhomogenitätsklassen Element01a - d

5.1.9 Grenzwertermittlung

Die Bestimmung der Grenzwerte (GW_n) erfolgt gesamthaft und separat für alle lokalen Inhomogenitätsklassen für die Gütekriterien GK_1 , GK_5 und GK_8 . Alle lokalen Inhomogenitätsklassen (alle außer ELEMENT01a -d) werden „lokalen oder globalen“ ausgewertet. Für die globalen Inhomogenitäten werden die Grenzwerte für die Gütekriterien GK_4 und GK_8 ausschließlich unter Berücksichtigung der „globalen“ Form ermittelt. Hierbei wird die Stufe „3 - deutlich wahrnehmbar“ abzüglich einer Streubreite von 0,5 als obere Grenze für die Probandenbewertung definiert. Da die Untersuchungsbeispiele nur in Ausnahmefällen exakt diesen Wert besitzen, wird die ermittelte Regressionsgerade des jeweiligen Gütekriteriums verwendet. Der Grenzwert

ergibt sich aus dem Schnittpunkt der Regressionsgeraden und einer Geraden zur Beschreibung der maximal zulässigen mittleren Probandenbewertung (siehe Abbildung 5.14).

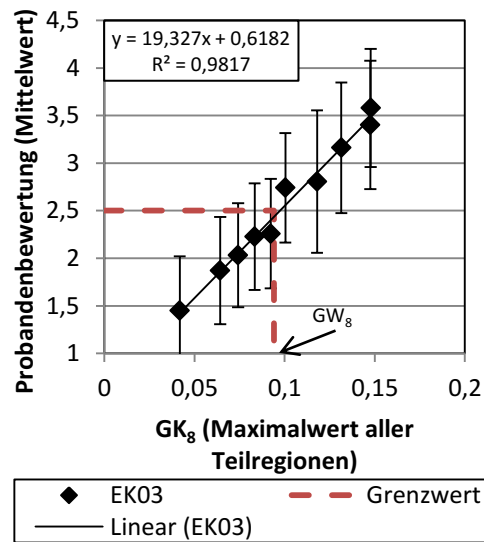


Abbildung 5.14: Grenzwertermittlung für die Inhomogenitätsklasse EK03

Die Berechnung der Schnittkoordinaten bzw. des Gütekriteriengrenzwerts wird nach Gleichung 5.2 unter Berücksichtigung der Steigung m , des y-Achse-Schnittpunkts der Regressionsgeraden b_{Schnitt} sowie der maximal zulässigen mittleren Probandenbewertung $OG = 2,5$ ermittelt.

$$GW_n = \frac{OG - b_{\text{Schnitt}}}{m} \quad (5.2)$$

5.1.9.1 Lokale Inhomogenitäten

Die Ergebnisse der Grenzwertbestimmung sind für die Gütekriterien GK_1 , GK_5 und GK_8 in Abbildung 5.15 bis 5.17 dargestellt. Für das Gütekriterium GK_1 variiert bei allen lokalen Inhomogenitätsklassen der Grenzwert um 1,65. Einzig der Streuwert für EK01 d liegt deutlich unterhalb von 1, was jedoch auf ein schlechtes Bestimmtheitsmaß von 0,1 zurückzuführen ist. Dadurch dass für Inhomogenitätsklassen derselbe Grenzwert festgelegt werden kann, kann das Gütekriterium GK_1 unabhängig von der Ausprägung der Inhomogenitätsklassen angewendet werden.

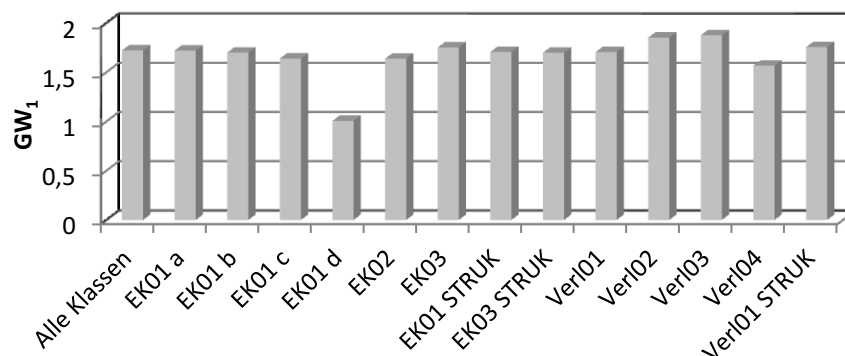


Abbildung 5.15: Grenzwert für GK_1 für alle lokalen Inhomogenitäten

Das Ergebnis der Grenzwertermittlung in Abbildung 5.16 zeigt, dass die Grenzwerte GW_5 für das Gütekriterium GK_5 sehr stark von der Ausprägung der Inhomogenität abhängen, da die Werte in einem Bereich von 1,0 bis 2,5 variieren. Für eine ausprägungsunabhängige Bewertung der Homogenität ist dieses Gütekriterium daher weniger gut geeignet.

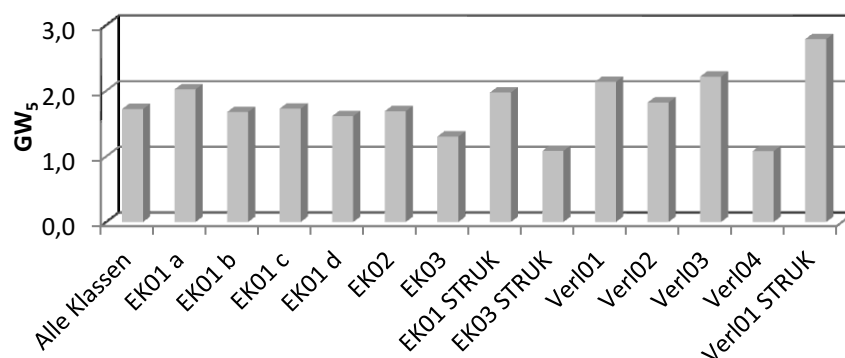


Abbildung 5.16: Grenzwert für GK_5 für alle lokalen Inhomogenitäten

Anhand Abbildung 5.17 wird verdeutlicht, dass das Gütekriterium GK_8 ebenfalls unabhängig von der Inhomogenitätsklasse verwendet werden kann. Der Grenzwert GW_8 liegt im Mittel

bei einem Zahlenwert von 0,11. Die größte Abweichung mit einem Wert von 0,14 ist bei den Inhomogenitätsklassen Ver101 und Ver101 vorzufinden.

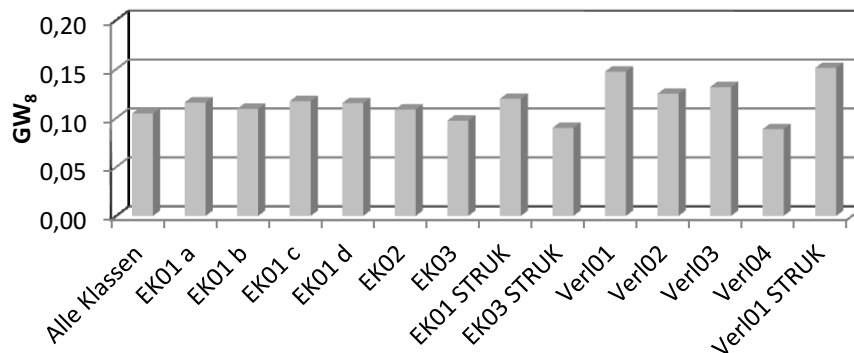
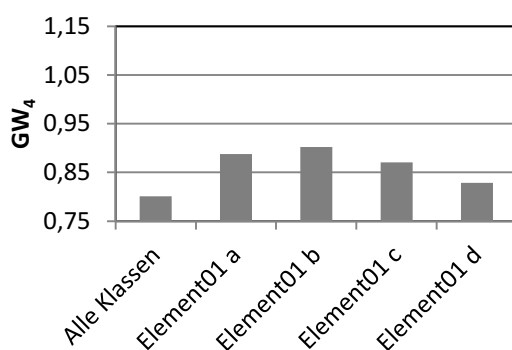


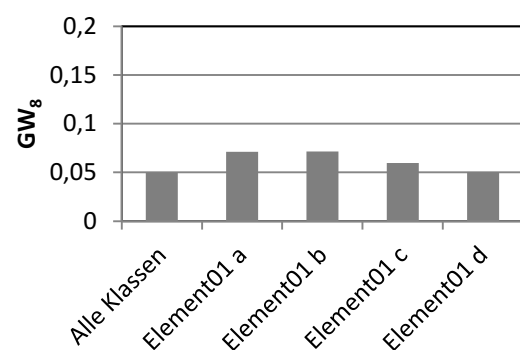
Abbildung 5.17: Grenzwert für GK_8 für alle lokalen Inhomogenitäten

5.1.9.2 Globale Inhomogenitäten

Die globalen Inhomogenitäten der Klassen Element01a bis d sind für die Gütekriterien GK_4 und GK_8 in Abbildung 5.18 visualisiert. Da die Grenzwerte der einzelnen Inhomogenitätsklassen nur wenig variieren, können beide Gütekriterien (GK_4 und GK_8) unabhängig von der mittleren Leuchtdichte der Gesamtleuchte für die Untersuchungsergebnisse aus WES-Versuchen eingesetzt werden. Es zeigt sich, dass bei der globalen Betrachtung für das Gütekriterium GK_4 ein mittlerer Grenzwert von 0,87 und für GK_8 ein mittlerer Grenzwert von 0,075 definiert werden kann. Im Vergleich zu den bewerteten lokalen Inhomogenitäten ist dieser Wert von GK_8 deutlich geringer, was wahrscheinlich auf die größere Dimension der Gesamtleuchte im Gegensatz zum einzelnen Lichtleiter zurückzuführen ist.



(a) Grenzwert für GK_4 für alle globalen Inhomogenitäten



(b) Grenzwert für GK_8 für alle globalen Inhomogenitäten

Abbildung 5.18: Grenzwerte für GK_4 und GK_8 für globale Inhomogenitätsklassen

5.1.10 Diskussion der Ergebnisse

Der Versuch mit dem WES hat gezeigt, dass eine Darstellung einer Heckleuchtenkombination an dem vorgestellten Warmerscheinungsbildsimulator mit dem gezielten Einbringen von Inhomogenitäten unter der Voraussetzung der im Straßenverkehr vorherrschenden Signalleuchtdichten reproduktiv möglich ist.

Analog zu den Untersuchungsergebnissen von Mensch zur Bewertung der Gleichmäßigkeit von Signalleuchten [68] konnte im Zuge der WES-Untersuchungen festgestellt werden, dass die Homogenitätsbewertung einer Leuchte nicht allein vom Kontrast, sondern auch von der Inhomogenitätsklasse abhängt, die durch eine Form, Größe, Art und Helligkeit gekennzeichnet ist. Daher werden z.B. verschiedene Arten von Verläufen oder Einkoppelstellen zu verschiedenen hellen Elementen bei gleichem maximalem Kontrast unterschiedlich von Probanden bewertet. Also beeinflussen die Kontrastschwellenwahrnehmung und die kognitiven Vergleiche die Homogenitätsbewertung.

Im nächsten Schritt wurden zwölf verschiedene Gütekriterien hinsichtlich einer objektivierten Bewertung der Homogenität einer Schlussleuchte mit Hilfe einer Korrelationsanalyse bewertet. Die Verwendung der Kriterien und die Korrelation der Ergebnisse erfolgte unter drei verschiedenen Gesichtspunkten, die drei Modellansätze darstellen. Beim ersten Modellansatz wird ausschließlich das schlechteste Element mit dem höchsten Wert der jeweiligen Gütekennzahl ausgewertet. Bei der zweiten Modellierung werden alle leuchtenden Flächen zusammengefasst und die Auswertung erfolgt global. Der dritte Modellansatz ist so gestaltet, dass die Ergebnisse der zwei vorherigen Modelle mit einer Oder-Verknüpfung verbunden werden. Der schlechtere der beiden Werte wird schließlich für die Korrelationsanalyse verwendet. Der Vergleich aller Bestimmtheitsmaße belegt, dass das zuletzt genannte Modell am besten für die Homogenitätsbewertung geeignet ist. Diese Erkenntnis deckt sich mit den Ergebnissen von Mensch, da in beiden Fällen, wenn auch in geringfügig anderer Form, mit der gleichzeitigen Auswertung der photometrischen Daten auf der lokalen und globalen Ebene das Bestimmtheitsmaß erhöht werden kann [68].

Unter der Voraussetzung der „richtigen“ Auswahl der Parameterwerte für die Schwellenmodelle kann die zuvor genannte These durch die Korrelationsanalyse mit den Gütekriterien GK_9 bis GK_{12} bestätigt werden, da mit diesem Verfahren anschaulich für verschiedene Inhomogenitätsklassen die sichtbaren Kontrastunterschiede detektiert werden. Das Bestimmtheitsmaß ist aber dennoch sehr schlecht (siehe z.B. Abbildung 3.7). Das von Mensch vorgeschlagene Gütekriterium GK_7 auf Basis des Variationskoeffizienten [68] ist ebenfalls nicht so gut für eine allgemeine Bewertung der Homogenität geeignet. Dies konnte auch in den Untersuchungen von Hahn bestätigt werden [45]. Wird jedoch die Auswertung auf eine Inhomogenitätsklasse beschränkt, kann mit dem Gütekriterium GK_7 , wie bei den anderen Gütekriterien, eine deutliche Verbesserung des Bestimmtheitsmaßes ($R^2 = 0,41$ zu $R^2 = 0,97$) erzielt werden.

Gemäß den Anforderungen aus Abschnitt 3.1 soll die Verwendung der Gütekriterien unabhängig von der Inhomogenitätsklasse möglich sein, da nur dann ein allgemein gültiger Grenzwert für die Homogenitätsbewertung ermittelt werden kann. Daher muss die Regressionsanalyse, wie erfolgt, über alle Inhomogenitäten erfolgen. Hierbei stellt sich die Schwerpunktmethode GK_8 als die am besten geeignete Methode für die Korrelation der subjektiven und objektiven Homogenitätsbewertung heraus. Mit diesem Gütekriterium kann die menschliche Bewertung von Inhomogenitäten unabhängig von der Technologie (Lichtleiter mit rückseitiger Prismenstruktur, glühender Körper usw.) sowie der Inhomogenitätsklasse zuverlässig und robust prädictiert werden.

Die Bewertung der Homogenität einer Leuchten erfolgt vor dem Hintergrund von lokalen und globalen Inhomogenitäten mit Hilfe von zwei Zahlenwerten des Gütekriteriums GK_8 und zwei dazugehörigen Grenzwerten GW_8 . Für die Auswertung von globalen Inhomogenitäten (z.B. dunkleres Lichtelement oder Heckleuchtenteil) wird auf Basis der ermittelten Ergebnisse empfohlen, den Zahlenwert aus der globalen Modellierung zu bestimmen (GK_{8-G}). Zur Bewertung von lokalen Inhomogenitäten wird der Zahlenwert des Gütekriteriums GK_{8-LG} auf Basis einer „lokalen oder globalen“ Auswertung berechnet. Dies bietet den Vorteil, dass symmetrische Inhomogenitäten auch ohne eine Aufteilung der definierten Region eines Lichtleiters robust detektiert werden können. Sind bei der Auswertung einer zu prüfenden Heckleuchte die Zahlenwerten GK_{8-G} größer als GW_{8-G} oder GK_{8-LG} größer als GW_{8-LG} , dann ist die Leuchte als inhomogen zu bewerten.

Die Darstellung der Ergebnisse aus Abbildungen 5.15 und 5.17 am Beispiel EK01 a bis d zeigen, dass die Grundhelligkeit mit einer mittleren Leuchtdichte von 230 cd/m^2 bis 830 cd/m^2 einer gleichen Inhomogenitätsklasse keinen großen Einfluss auf den Grenzwert nimmt. Unterschiedliche Formen von Inhomogenitäten rufen dieselben Grenzwerte hervor. Analog dazu verändert sich der Grenzwert bzw. verschlechtert sich die Homogenitätsbewertung der Probanden auf Grund einer überlagerten Prismenstruktur nicht. Der mittlere Grenzwert für alle lokalen Inhomogenitäten liegt bei $GW_{8-LG}=0,1$ und schwankt in den jeweiligen Inhomogenitätsklassen um diesen Wert. Bei der globalen Betrachtung desselben Gütekriteriums wird über einen Helligkeitsbereich von 230 cd/m^2 bis 830 cd/m^2 ein mittlerer Grenzwert von $GW_{8-G} = 0,06$ ermittelt. Auch bei den globalen Inhomogenitäten besteht kein Zusammenhang zwischen Grenzwert und dargebotenem Helligkeitsbereich.

5.2 Validierungsuntersuchungen mit realen Heckleuchten unter nachtähnlichen Bedingungen

5.2.1 Ziel der Untersuchungen

Mit Hilfe des nachfolgenden Validierungsversuchs soll die Übertragbarkeit der Ergebnisse aus den WES-Versuchen auf Serienheckleuchten mit unterschiedlichen Geometrien und Helligkeitsniveaus geprüft werden. Hierbei werden als Randparameter zunächst zwei Umgebungslichtbedingungen und eine Beobachtungsentfernung festgelegt, welche den typischen Szenarien einer Homogenitätsbewertung aus Kapitel 2.2.2 entsprechen (Verkehrssituation in der Nacht sowie ein beleuchteter Verkaufsraum).

Der besondere Fokus der Untersuchungen liegt darin, erneut die Verwendbarkeit der bisher zur Verfügung stehenden und neu entwickelten Gütekriterien GK_1 bis GK_{12} zu widerlegen bzw. für Gütekriterien mit guten Korrelationseigenschaften zu bestätigen, da reale Leuchten im Gegensatz zu simulierten Leuchten einen höheren Dynamikumfang, feinere Strukturen und zusätzliche Reflexionen aufweisen. Abgeleitet aus der Korrelationsanalyse sollen Grenzwerte unter Berücksichtigung der genannten Randbedingungen ermittelt werden und mit den vorherigen und anderen in der Literatur ermittelten Ergebnissen verglichen werden.

5.2.2 Versuchsaufbau

In Abbildung 5.19 ist schematisch der Aufbau des Validierungsversuchs mit skotopischen und mesopischen Umfeldleuchtdichten ($0,01 \text{ cd/m}^2$ und 3 cd/m^2) dargestellt. Im Versuch bewerten die Probanden zwölf verschiedene BMW-Schlussleuchten aus einer Distanz von 4 m.

Der Proband betrachtet auf einem Stuhl sitzend foveal die Schlussleuchten in einer senkrechten sowie in einer um 30° horizontal gedrehten Einbaulage. Damit eine Vergleichbarkeit der Versuchsergebnisse gegeben ist, sind im Rahmen des Versuchs zwei Stuhlreihen so angeordnet, dass die Beobachtungsentfernung von 4 m für beide Winkel gegeben ist. Da nicht alle zwölf Leuchten aufgrund der räumlichen Begrenzung nebeneinander aufgebaut werden können, sind nur die Leuchten P1 - P8 auf einer Anbauhöhe von circa 100 cm über dem Boden positioniert. In Verbindung mit der durchschnittlichen Augenhöhe der Probanden entspricht dies einem vertikalen Blickwinkel von 0° . Die Leuchten P9 - P12 sind in einer Höhe von 30 cm positioniert, was einem vertikalen Blickwinkel von circa 10° entspricht.

Anders als beim vorangegangenen WES-Versuch werden bei diesem Versuch, wie in Abbildung 5.20 gezeigt, grundsätzlich verschiedene Leuchten verwendet, die sich in der geometrischen Gestaltung und der Helligkeit in Form der mittleren Leuchtdichte unterscheiden. Das Leuchtenkollektiv wurde so gestaltet, dass es nach Expertenaussagen sowohl inhomogene als auch homogene Leuchten berücksichtigt.

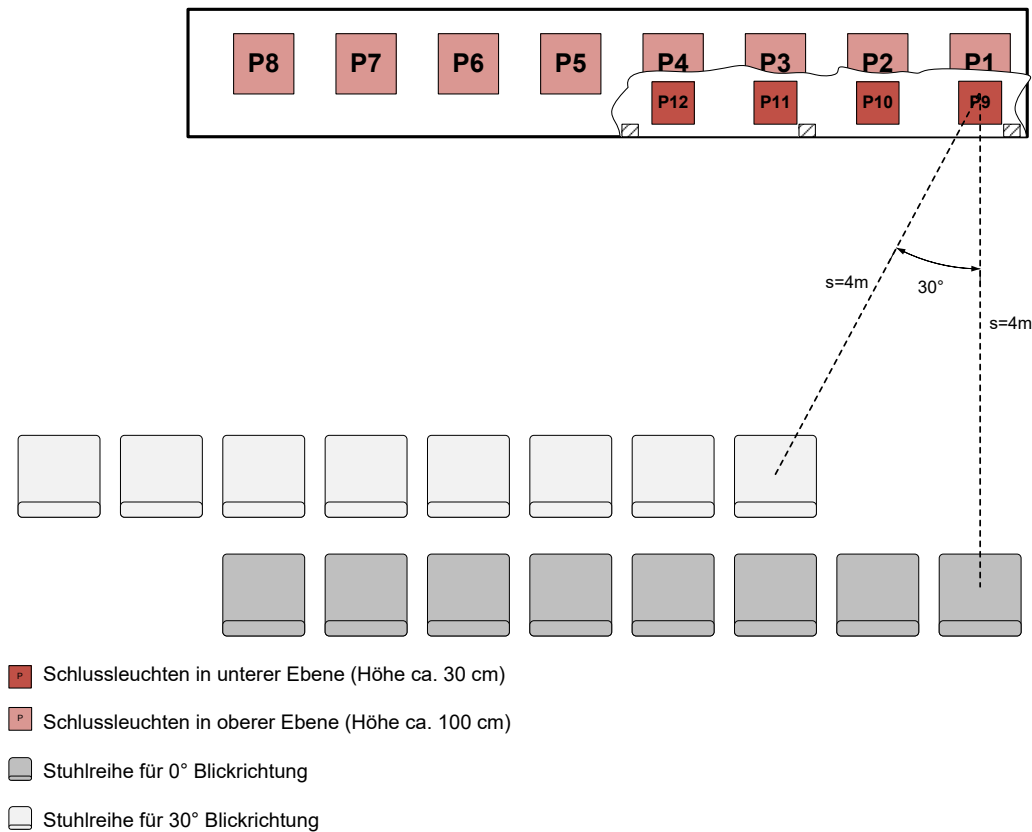


Abbildung 5.19: Schematischer Aufbau des Validierungsversuchs mit skotopischen und mesopischen Umfeldleuchtdichten ($0,01 \text{ cd/m}^2$ und 3 cd/m^2)

Die Heckleuchten P1 - P12 sind in Verbindung mit einer LED-Lichtquelle in Lichtleiter- sowie Glühende-Körper-Technik ausgeführt. Die Leuchten P1 - P8 entsprechen den Serienteilen, die in Fahrzeugen der BMW-Group zum Einsatz kommen. Hierbei entspricht die Leuchte P2 der geometrischen Kontur der simulierten Heckleuchte aus dem WES-Versuchen. Die Heckleuchten P9 - P12 besitzen dieselbe Form und stellen gezielt aufgebaute Grenzmuster für Inhomogenitäten eines Fahrzeugderivats dar.

5.2.3 Bewertung der photometrischen Systemeigenschaften

In Abbildung 5.20 werden die Ergebnisse der Leuchtdichteaufnahmen der zwölf verwendeten Heckleuchten in Form einer Falschfarbendarstellung visualisiert. Abbildung 5.20 zeigt die Leuchten aus einer frontalen Beobachtungsrichtung ohne zusätzlich eingeschaltete Umgebungslichtquellen bei einer Umgebungsleuchtdichte $L_B = 0,01 \text{ cd/m}^2$. Die Leuchtdichteaufnahmen der seitlichen Beobachtungsrichtung (H30) sind im Anhang F.1 dokumentiert. Die mittlere Leuchtdichte des Schlusslichts aller Heckleuchten variiert zwischen 330 bis 1500 cd/m^2 (siehe Abbildung 5.21).

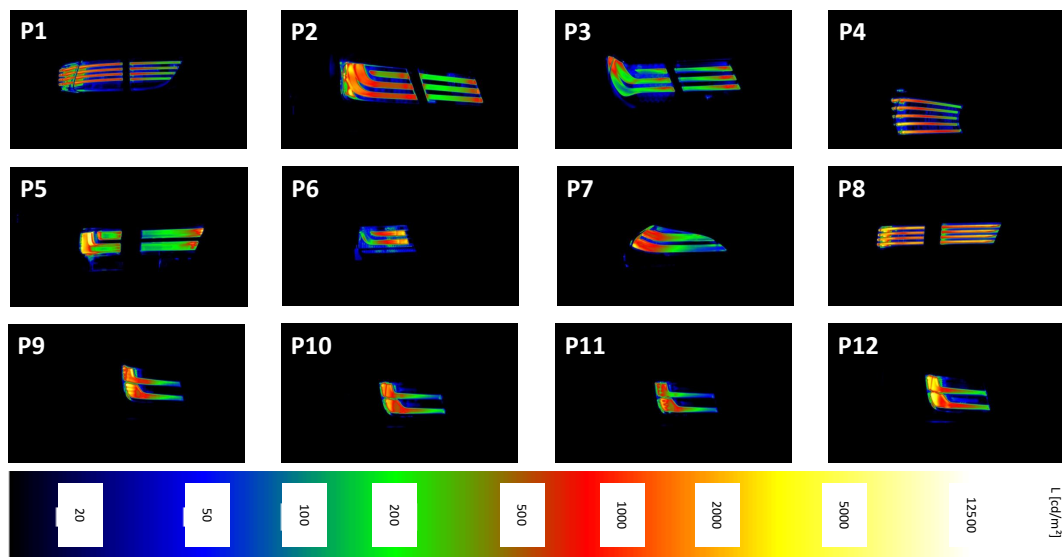


Abbildung 5.20: Leuchtdichteaufnahmen der verwendeten Heckleuchten aus der HV-Richtung bei dunklen Umgebungsbedingungen

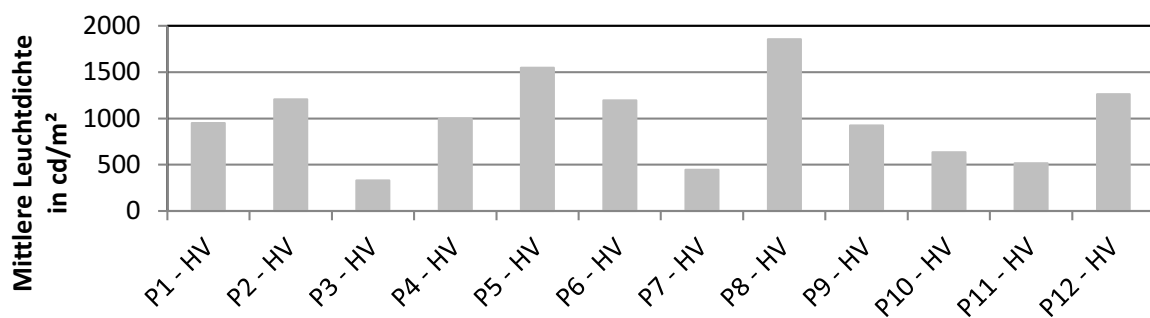


Abbildung 5.21: Mittlere Leuchtdichte der verwendeten Heckleuchten aus der HV-Richtung bei dunklen Umgebungsbedingungen

5.2.4 Versuchsprotokoll und -durchführung

Mit Hilfe des Validierungsversuchs wurden über 2.392 Probandenergebnisse zur Empfindung von Inhomogenitäten bei zwölf verschiedenen, realen Heckleuchten ermittelt.

Die Probandenuntersuchung ist in zwei Abschnitte gegliedert. Im ersten Teil des Versuchs bewerten die Probanden die Heckleuchten in einer dunklen und im zweiten Teil in einer hellen Umgebung. Während des gesamten Versuchs bewerten die Probanden die Heckleuchten nacheinander, wobei immer nur eine Heckleuchte gleichzeitig eingeschaltet ist.

Der erste Teil des Versuchsablaufs ist so gestaltet, dass die Probanden alle Heckleuchten in HV in einer dunklen Umgebung bewerten. Der Versuchsabschnitt beinhaltet zudem vier Trainingsmuster aus dem Leuchtenkollektiv. Anschließend werden die Heckleuchten unter

einem seitlichen Beobachtungswinkel von 30° horizontal nacheinander in derselben Reihenfolge wie zuvor bewertet. Dieser Versuchsablauf gilt analog für die Untersuchungen in der hellen Umgebung. Die Rahmenbedingungen des Versuchs sind zusammenfassend in Tabelle 5.5 dargestellt.

Tabelle 5.5: Zusammenstellung der Rahmenbedingungen zu den Validierungsuntersuchungen mit realen Heckleuchten unter nachtähnlichen Bedingungen

Rahmenbedingungen der Untersuchungen	
Anzahl verschiedener Leuchten	12 Stück
Eingesetzte Heckleuchten	8 Serienleuchten (P1-8) 4 Vorserienleuchten (P9-12)
Mittlere Leuchtdichte 0°	270 cd/m^2 bis $1\,500 \text{ cd/m}^2$
Maximale Leuchtdichte 0°	$12\,550 \text{ cd/m}^2$
Mittlere Leuchtdichte 30°	200 cd/m^2 bis 800 cd/m^2
Maximale Leuchtdichte 0°	$34\,400 \text{ cd/m}^2$
Umgebungsleuchtdichte (dunkel)	$\approx 0,01 \text{ cd/m}^2$
Umgebungsleuchtdichte (hell)	$\approx 3 \text{ cd/m}^2$
Horizontale Blickrichtung der Testpersonen	0° und 30°
Dauer des Versuches	30 – 40 Minuten
Anzahl Versuchspersonen	46
Geschlechteraufteilung	41 (m) und 5 (w)
Altersgruppe der Probanden	20 – 58 Jahre
Durchschnittsalter	24 Jahre

5.2.5 Vorstellung der Ergebnisse

Abbildung 5.22 zeigt auf der y-Achse den Mittelwert für die jeweiligen Umgebungsleuchtdichten und die Betrachtungsposition. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wird an dieser Stelle auf die Darstellung der Standardabweichung der Probandenbewertung verzichtet. Auf der x-Achse werden die Heckleuchten in dem Diagramm angeordnet.

Allgemein kann die Aussage getroffen werden, dass die Heckleuchten sehr unterschiedlich bewertet worden sind. Das Leuchtenkollektiv beinhaltet aus der Sicht der Probanden sowohl inhomogene als auch homogene Heckleuchten, was durch die Mittelwertbandbreite von 1,26 bis 3,37 belegt werden kann. Die Mittelwerte erreichen die Extremwerte nicht.

Anhand Abbildung 5.22 und durch die Signifikanzanalysen aus Anhang F.2 zeigt sich, dass die Probandenbewertung durch die Beobachtungsrichtung und der Umgebungshelligkeit signifikant beeinflusst wird. Die Heckleuchten P2, P4 und P5 werden im Gegensatz zu einer frontalen Begutachtung bei der seitlichen Betrachtung deutlich unterschiedlich bewertet (Effektstärke d nach Cohen größer 0,8 - siehe Anhang F.2). Bei der Leuchte P4 kann die schlechtere mittlere Probandenbewertung so begründet werden, dass durch die seitliche Beobachtungsposition die direkte Einsicht auf blendende Lichtquelle ermöglicht wird. Der genau entgegengesetzte Effekt ist bei den Heckleuchten P2 und P5 festzustellen. Somit nimmt das bei einigen Leuchten vorhandene richtungsabhängige Erscheinungsbild eindeutig Einfluss auf die Probandenbewertung. Jedoch kann sich die Richtungsabhängigkeit auf Grund der Dreidimensionalität einer Leuchte bei einer alleinigen Beobachtung aus einer Richtung sowohl positiv als auch negativ auswirken. Somit kann nicht pauschal die Aussage getroffen werden, dass sich mit der Erhöhung des Beobachtungswinkels die Probandenbewertung verschlechtert. Da ein Beobachter jedoch in der Regel eine Leuchte aus mehreren Richtungen beobachtet, wird die Gesamtbewertung stets auf Basis des schlechtesten Erscheinungsbilds gebildet (siehe Abschnitt 4.2.6). Für die Auslegung der Technik sollte wegen der entwicklungsbegleitenden Randbedingungen daher ein Kompromiss für alle Beobachtungsrichtungen gefunden werden.

Außerdem verdeutlicht Abbildung 5.22, dass nur sehr geringe Abweichungen zwischen den Probandenergebnissen bei dunklen und hellen Umgebungsbedingungen bei gleicher Beobachtungsrichtung vorzufinden sind. Tendenziell werden die Heckleuchten bei einer frontalen Beobachtungsposition in einer dunkleren Umgebung schlechter beurteilt und besitzen daher eine höhere mittlere Bewertung. Diese Tendenz bestätigt sich jedoch für die seitliche Betrachtungsposition nicht, da mehrere Heckleuchten in einer dunkleren Umgebung schlechter als in einer hellen Umgebung bewertet werden. Somit kann die Aussage getroffen werden, dass die Umgebungshelligkeit im Rahmen von $L_b = 0,05$ bis 3 cd/m^2 keinen entscheidenden Einfluss auf die Probandenbewertung nimmt. Um mögliche Auswirkungen der Umgebungsleuchtdichte auf die Probandenbewertungen dennoch zu ermitteln, wird in Abschnitt 5.3 ein weiterer Versuch mit Hilfe einer Tageslichtsimulation durchgeführt.

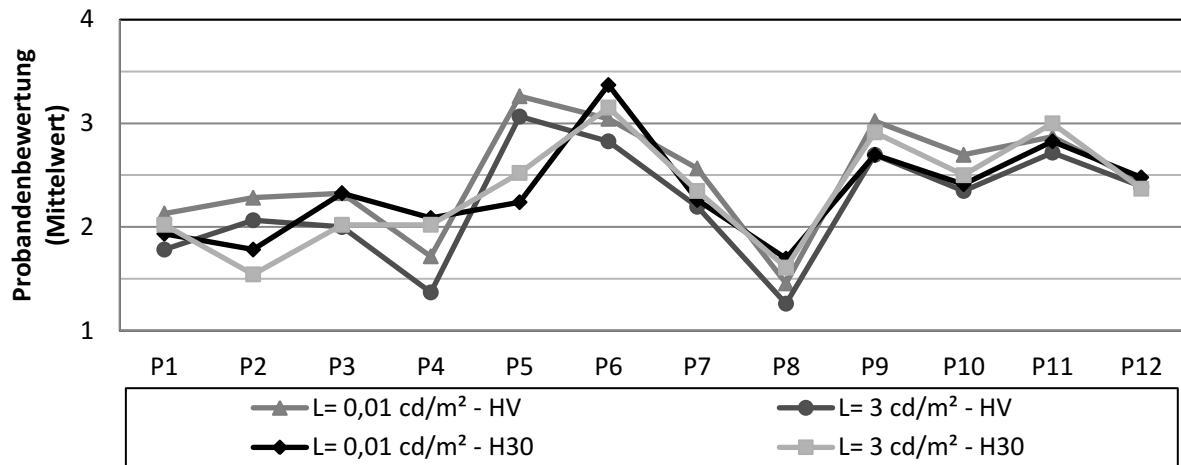


Abbildung 5.22: Mittelwert der Probandenbewertung aus den Validierungsversuchen

5.2.6 Korrelationsanalyse

In Anlehnung an das in Abschnitt 5.1.8 vorgestellte Verfahren wird im Rahmen der Korrelationsanalyse auch bei der Probandenstudie mit den realen Heckleuchten die Eignung der verschiedenen Gütekriterien untersucht. Eine erneute Untersuchung hinsichtlich der Eignung liegt darin begründet, dass der Dynamikumfang der Leuchtdichten und die Komplexität der realen Leuchten auf Grund der Dreidimensionalität und der wechselnden Strukturen innerhalb und außerhalb der zur Lichtfunktion zugehörigen Flächen deutlich höher sind. Daher ist eine Beeinflussung des Bestimmtheitsmaßes der Gütekriterien denkbar.

Abbildung 5.23 zeigt über alle Proben, d.h. bei frontaler und seitlicher Betrachtung sowie bei dunklen und hellen Umgebungsbedingung, das Bestimmtheitsmaß aller in Abschnitt 5.1.8 vorgestellten Gütekriterien. Die Korrelationsanalyse ist dazu in Anhang F.3.2 dokumentiert. Zusätzlich ist eine separate Analyse der Bestimmtheitsmaße für die jeweiligen Teilversuche in Anhang F.3.1 zu finden. In Abbildung 5.23 zeigt sich, dass das Bestimmtheitsmaß bei den realen Heckleuchten im Gegensatz zu den simulierten Heckleuchten abnimmt.

Die Gütekriterien GK_5 , GK_6 ($R^2 = 0,37$), GK_8 ($R^2 = 0,48$), GK_9 ($R^2 = 0,40$) weisen die höchsten Kennzahlen des Bestimmtheitsmaßes auf. Die Zahlenwerte des Bestimmtheitsmaßes der kontrastschwellenmodellbasierten Gütekriterien GK_9 - GK_{12} sind im Vergleich zu den WES-Ergebnissen fast identisch, wobei GK_9 über alle verglichenen Gütekriterien den zweithöchsten Wert besitzt. Analog zum Ergebnis der Regressionsanalyse der WES-Versuche ist GK_8 auf Basis der verschiedenen Schwerpunkte das am besten geeignete Gütekriterium zur Bewertung von Inhomogenitäten von realen Heckleuchten mit Lichtleitern oder glühenden Körpern. Wie in Abschnitt 5.1.8 vorgestellt, kann mit der Oder-Verknüpfung des globalen und lokalen Gütekriteriums der höchste Kennwerte für GK_8 erzielt werden.

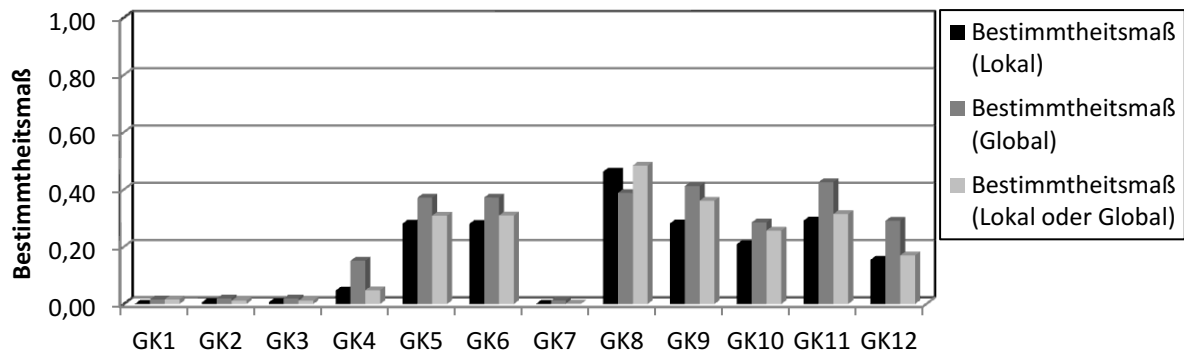


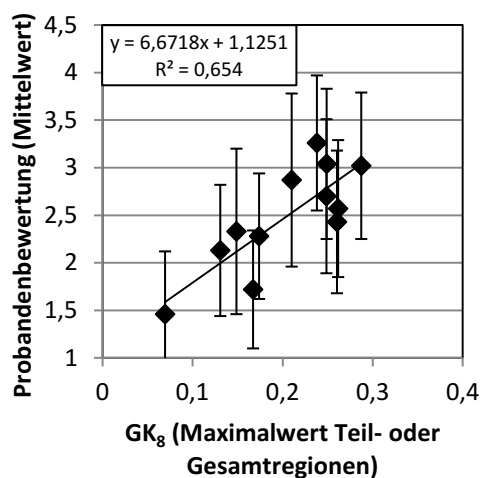
Abbildung 5.23: Bestimmtheitsmaß Validierungsversuch: Alle Beobachtungsrichtungen und beide Umfeldleuchtdichten ($L_B \approx 0,01 - 3 \text{ cd/m}^2$)

In Abbildung 5.23 zeigt sich zudem, dass nicht alle der verwendeten Gütekriterien eine hohe Korrelation zwischen den subjektiven Probandenbewertungen und den objektiven photometrischen Kenngrößen aufweisen. Wie in Kapitel 3 postuliert, können mit Gütekriterien auf Basis von statistischen Bewertungsmethoden mit Streuungsparametern sowie mit Extremwerten anders als den WES-Versuchen keine robusten Vorhersagen im Hinblick auf die Homogenitätsbewertung gemacht werden. Das Gütekriterium GK_7 auf Basis der Streuungsparameter weist ebenso ein niedriges Bestimmtheitsmaß auf. Daher werden die zuvor genannten Gütekriterien nicht für die Bewertungen von Inhomogenitäten weiterempfohlen.

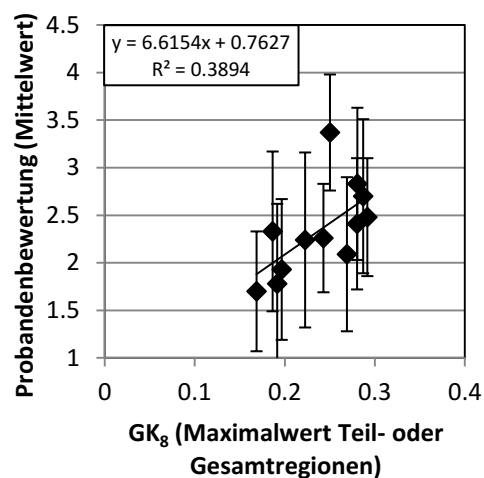
Werden die Teilabschnitte der Probandenstudie separat analysiert, zeigt sich erneut, dass das Bestimmtheitsmaß deutlich höhere Werte annimmt (siehe Abbildungen 5.24(a) und 5.24(b) sowie Abbildungen 5.25(a) und 5.25(b)). Hierbei variiert das Bestimmtheitsmaß R^2 des Gütekriteriums GK_8 in einem Rahmen von 0,65 bei der frontalen Betrachtung bei einer dunklen Umgebungshelligkeit bis 0,38 bei der frontalen Betrachtung bei einer hellen Umgebungshelligkeit. Trotz des niedrigen Bestimmtheitsmaßes von $R^2 = 0,38$ sollte das Gütekriterium GK_8 ebenfalls für die Bewertung von Signalleuchten in hellen Umgebungen eingesetzt werden, da der Wert des Bestimmtheitsmaßes nur durch einen Ausreißer negativ beeinflusst wird (siehe Abbildungen 5.24(b) und 5.25(b)).

Dieser Ausreißer kann durch eine Besonderheit der Heckleuchte P6 begründet werden. Die Heckleuchte P6 ist die einzige Leuchte im Leuchtenkollektiv, bei der die Lichtleiter nicht um die Ecke gebogen sind und die Lichtkone ausschließlich durch eine ebene Fläche dargestellt wird. Daher steigt der Wert des Gütekriteriums GK_8 bei einer seitlichen Betrachtung der Leuchte nicht proportional zu dem Faktor an, wie sich die sichtbare Fläche verringert.

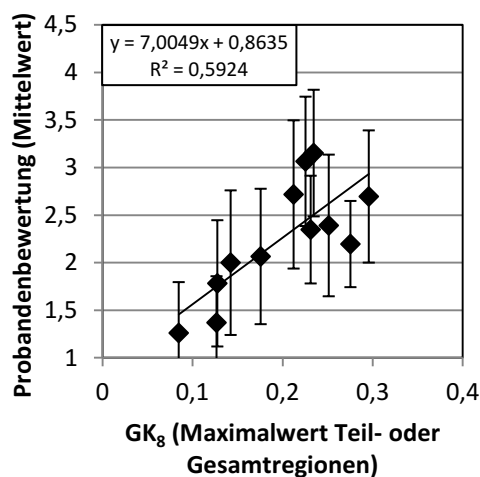
Ohne die Berücksichtigung der Leuchte P6 kann in der dunklen Umgebung bei einer seitlichen Betrachtung ein Bestimmtheitsmaß von $R^2=0,65$ und in der hellen Umgebung bei einer seitlichen Betrachtung ein Bestimmtheitsmaß von $R^2=0,62$ erzielt werden. Somit besitzt das Bestimmtheitsmaß ohne Berücksichtigung der Heckleuchte P6 bei allen Beobachtungsrichtungen dieselbe



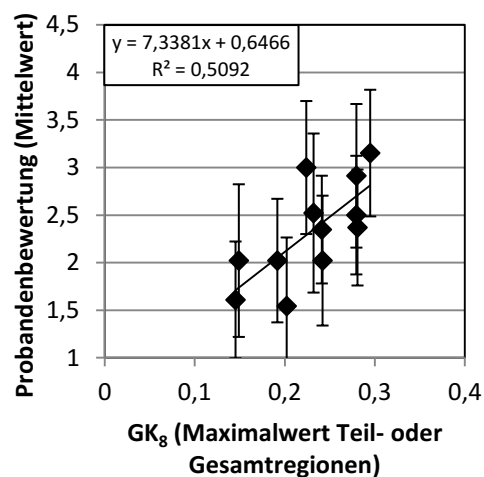
(a) Frontale Beobachtungsrichtung



(b) Seitliche Beobachtungsrichtung

Abbildung 5.24: Korrelationsanalyse Validierungsversuch: Dunkle Umgebung ($L_B \approx 0,01 \text{ cd/m}^2$) - Gütekriterium GK_8 

(a) Frontale Beobachtungsrichtung



(b) Seitliche Beobachtungsrichtung

Abbildung 5.25: Korrelationsanalyse Validierungsversuch: Helle Umgebung ($L_B \approx 3 \text{ cd/m}^2$) - Gütekriterium GK_8

Größenordnung. Unabhängig von dem Bestimmtheitsmaß wird die Heckleuchte P8 mit dem Gütekriterium GK_8 in Verbindung mit dem im nächsten Abschnitt ermittelten Grenzwert GW_8 als inhomogen bewertet.

5.2.7 Grenzwernermittlung

Die Bestimmung der Grenzwerte erfolgt gemäß Gleichung (5.2) separat und gesamthaft für alle Abschnitte des Validierungsversuchs. Da allein das Gütekriterium GK_8 auf Basis der Schwerpunktmethodologie zufriedenstellende Regressionskennzahlen besitzt, werden die Grenzwerte ausschließlich für dieses Kriterium auf Grundlage einer „lokalen oder globalen“ Bewertung ermittelt. Analog zu Abschnitt 5.1.9 wird die maximal zulässigen mittleren Probandenbewertung $OG = 2,5$ definiert.

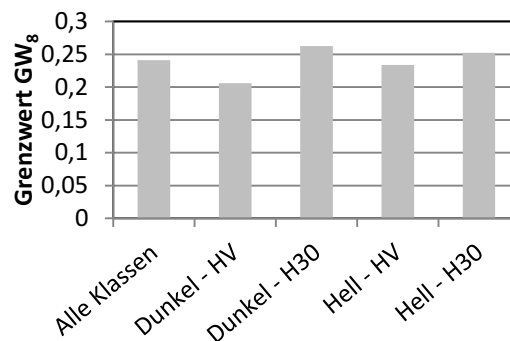


Abbildung 5.26: Grenzwert für GK_8 für alle Beobachtungsrichtungen und Umgebungslichtdichten von 0,01 bis 3 cd/m^2 - „lokal oder global“ Auswertung

Das Ergebnis dieser Grenzwernermittlung ist in Abbildung 5.26 dargestellt. Es zeigt sich, dass der Grenzwert aller Versuchsabschnitte um einen Wert von $GK_8 = 0,24$ schwankt. Die Bandbreite der Grenzwerte umfasst einen Bereich von maximal 0,26 bis minimal 0,21. Die frontale Bewertung der Leuchten in einer dunklen Umgebung stellt den kritischsten Fall für die Homogenitätsbewertung dar, da der Grenzwert hier am niedrigsten ist ($GK_8=0,21$).

Die Grenzwerte von GK_8 streuen für die jeweiligen Bewertungssituationen (dunkle - helle Umgebung sowie frontale - seitliche Betrachtung) nur geringfügig. Daher kann analog zu der zuvor getroffenen Aussage aus Abschnitt 5.1.9 durch die Validierungsversuche bestätigt werden, dass das Gütekriterium GK_8 unabhängig von Inhomogenitätsklassen, Geometrie sowie mittlerer Helligkeit einer Signalleuchte und von Umgebungshelligkeit im Rahmen von 0,05 bis 3 cd/m^2 zur Bewertung von Inhomogenitäten einsetzbar ist.

Im Vergleich zu den in Abschnitt 5.1.9 ermittelten Grenzwerten für das Gütekriterium GK_8 sind die in Abbildung 5.26 gezeigten Werte deutlich höher. Die im Rahmen der WES-Versuche bestimmten Grenzwerte variieren um einen Zahlenwert von 0,11 (vgl. Abbildung 5.17). Die

höhere Toleranz der Probanden gegenüber objektiv gemessenen Inhomogenitäten kann durch die komplexere Sehaufgabe erklärt werden, welche die realen Heckleuchten darstellen.

5.2.8 Diskussion der Ergebnisse

Im Zuge des Validierungsversuchs unter nachtähnlichen Bedingungen wurde eine Objektivierung der Homogenitätsbewertung mit zwölf Heckleuchten durchgeführt. Das Versuchskollektiv umfasst gemäß der subjektiven Probandenbewertung sowohl homogene als auch inhomogene Heckleuchten.

Mit Hilfe der durchgeführten Probandenstudie konnte ermittelt werden, dass subjektive Homogenitätsbewertungen durch die Umgebungshelligkeit in einem Bereich von $\approx 0,01 - 3 \text{ cd/m}^2$ beeinflusst werden. Jedoch ist der Effekt der Mittelwertunterschiede in allen Fällen nicht stark ausgeprägt (nach Cohens Effektstärke). Eine abschließende Bewertung zum Einfluss der Umgebungshelligkeit kann jedoch erst nach Abschnitt 5.3 gegeben werden, da erst in diesem Versuch die Probandenbewertung von Leuchten unter tageslichtähnlichen Umgebungsbedingungen erfolgt.

Die Beobachtungsrichtung auf die Leuchten ruft bei einigen Leuchten deutliche Unterschiede in der Probandenbewertung hervor. Jedoch korreliert die Probandenbewertung entgegen der Untersuchungen von Mensch nicht in Abhängigkeit der horizontalen Beobachtungsrichtung [68]. Die unterschiedlichen Ergebnisse liegen in der Dreidimensionalität der lichtleiterbasierten Leuchten begründet, die die photometrischen Eigenschaften maßgeblich sowohl positiv als auch negativ beeinflussen (bessere und schlechtere Lichtbrechung oder Einsicht und Verdeckung von LED-Lichtquellen bei seitlicher Beobachtung).

Durch eine erneute umfassende Korrelationsanalyse wurde festgestellt, dass das Bestimmtheitsmaß bei realen Heckleuchten über alle Gütekriterien hinweg abnimmt. In einigen Fällen, wie bei den Gütekriterien auf Basis der Bewertungsmethoden mit Extremwerten und auf Basis des Variationskoeffizienten, ist die Korrelation so gering, dass diese für die Homogenitätsbewertung vollkommen ungeeignet sind. Infolge der ermittelten Ergebnisse werden diese Gütekriterien nicht für die Homogenitätsbewertung empfohlen und nicht weiterverwendet.

Analog zu den WES-Versuchen ist GK_8 auf Basis der Schwerpunktmethode das am besten geeignete Gütekriterium zur objektivierten Bewertung der Homogenität einer Signalleuchte. Das Kriterium kann unabhängig von Form, Helligkeit und Ausdehnung einer Leuchte für eine robuste Voraussage der Homogenitätsbewertung verwendet werden. Als Grenzwerte für GW_{8-LG} für die Bewertungsstufe „3 - deutlich wahrnehmbar“ wurde ein Zahlenwert von 0,21 für die frontale Beobachtung einer Leuchte in einer dunklen Umgebung ($\approx 0,01 \text{ cd/m}^2$) ermittelt. Im Vergleich zum WES-Versuch (0,10) ist dieser Grenzwert deutlich größer. Dies kann auf die höhere Komplexität (mehr Strukturen, größerer Dynamikumfang und Mitleuchten von nicht zur Lichtfunktion gehörigen Flächen) und auf die Dreidimensionalität der realen Leuchten

zugeführt werden. In der Literatur ist dieses Phänomen unter dem Begriff des Kontrast-Effekts bekannt [113]. Übertragen auf die Homogenitätsuntersuchungen bedeutet dies, dass eine leuchtende Fläche, z.B. ein Lichtleiter, inhomogener wirkt, wenn diese mit einer umliegenden homogenen Flächen verglichen werden. Der genau entgegengesetzte Effekt tritt ein, wenn sich die zu bewertende Fläche im Umfeld einer inhomogenen Fläche (z.B. umliegende inhomogene mitleuchtende Streuscheibe) befindet.

5.3 Validierungsuntersuchungen mit realen Heck- und Frontleuchten unter tageslichtähnlichen Bedingungen

5.3.1 Ziel der Untersuchungen

Mit den nächsten Untersuchungen soll die Fragestellung beantwortet werden, inwiefern sich eine tageslichtähnliche Beleuchtungssituation auf die Homogenitätsbewertung auswirkt. Hierbei soll der Einfluss einer deutlich höheren Umgebungsleuchtdichte und von Fremdlicht bedingten Reflexionen innerhalb einer Leuchte auf die Verwendbarkeit der einzelnen Gütekriterien und die Auswirkungen auf die maximal zulässigen Grenzwerte ermittelt werden.

Des Weiteren ist es ein Ziel der Untersuchungen, die Verwendbarkeit der am besten geeigneten Kriterien für andere Lichtfunktionen zu überprüfen, welche durch eine andere Lichtfarbe und Lichtintensität gekennzeichnet sind, z.B. Positionslicht und Tagfahrlicht. Abschließend sollen auch für diese Lichtfunktionen Grenzwerte abgeleitet werden.

5.3.2 Versuchsaufbau

In Abbildung 5.27 ist der Aufbau des Validierungsversuchs mit photopischen Umfeldleuchtdichten schematisch dargestellt.

Im Zuge des Versuchs bewerteten die Probanden 17 verschiedene BMW-Leuchten aus einer Distanz von 4 m und in der Blickrichtung HV. Das Leuchtenkollektiv besteht aus den zwölf zuvor in Kapitel 5.2 verwendeten Heckleuchten sowie fünf weiteren Frontleuchten. Die Reihenfolge der Heckleuchten ist analog zu dem Versuch aus Abschnitt 5.2. So kann die Übertragbarkeit der vorherigen Versuchsergebnisse gewährleistet werden. Durch die Hinzunahme der zusätzlichen Frontleuchten kann im Versuch die Anwendbarkeit der Gütekriterien im Hinblick auf die Homogenitätsbewertung auch für weiße Lichtfunktionen, wie Tagfahr- und Positionslicht, geprüft werden. Wegen der begrenzten Dimension des Tageslichtsimulators (9,5 m) können nicht alle 17 Leuchten nebeneinander aufgebaut werden. Daher sind nur die Leuchten P1 - P8 und P13 - P17 nebeneinander auf einer Anbauhöhe von circa 100 cm über dem Boden installiert. Die Leuchten P9 - P12 sind in einer Höhe von 30 cm positioniert. Der Abstand zwischen der dahinter stehenden Tageslichtwand und den Versuchsmustern beträgt 1 m.

Zur Erzeugung der notwendigen Umfeldleuchtdichten wird der bereits vorhandene Tageslichtsimulator der BMW Group verwendet. Der Simulator bietet die Möglichkeit, straßenverkehrsähnliche Leuchtdichteverteilungen über eine Fläche von circa 50 m² durch horizontal angeordnete und ansteuerbare Leuchtstofflampen zu generieren [53].

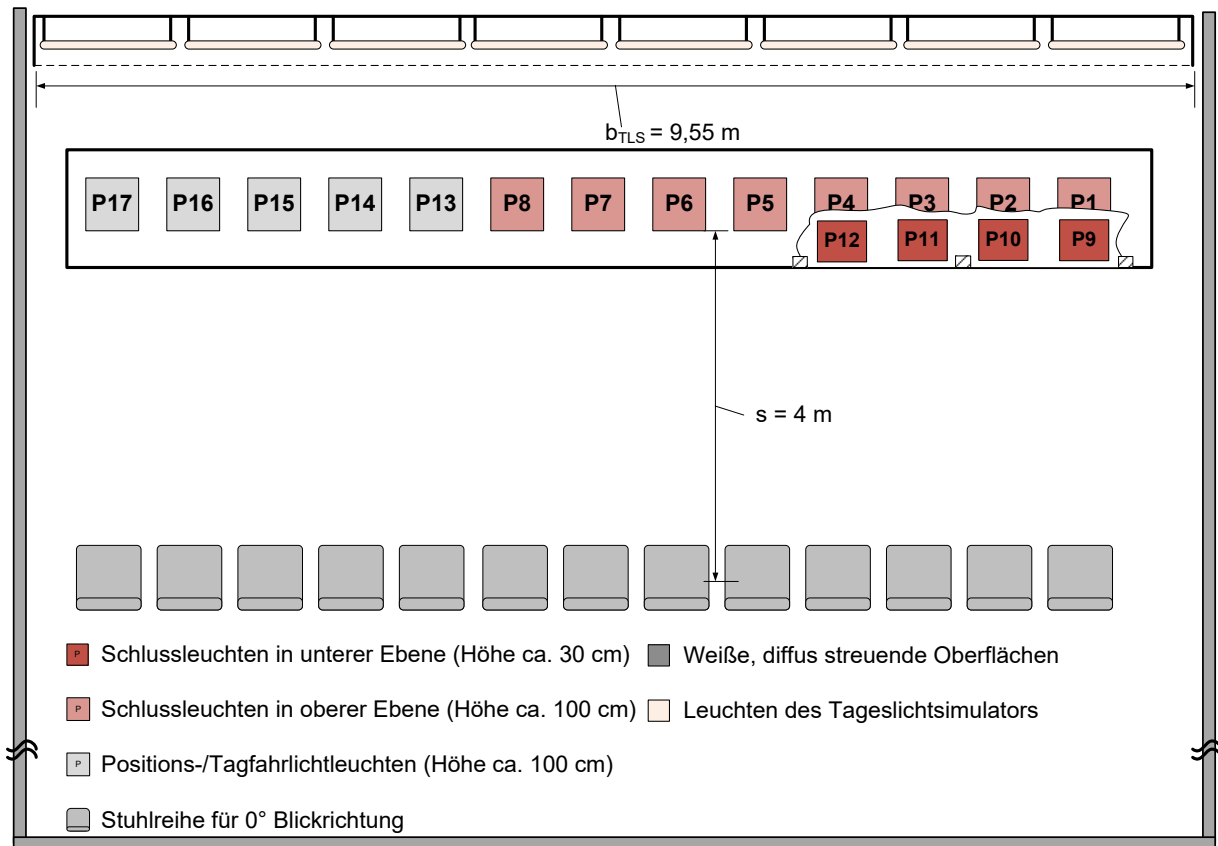


Abbildung 5.27: Schematischer Aufbau des Validierungsversuchs mit photopischen Umfundleuchtdichten

5.3.3 Bewertung der photometrischen Systemeigenschaften

In Abbildung 5.28 und 5.29 werden die Ergebnisse der Leuchtdichteaufnahmen der zwölf verwendeten Heckleuchten sowie der fünf verwendeten Frontleuchten unter der Berücksichtigung der eingeschalteten Tageslichtsimulation visualisiert.

In Abbildung 5.28 ist ersichtlich, dass bei einigen der dargestellten Leuchten (z.B. P4) Reflexionen bzw. Fremdlichter zu erkennen sind, die durch den Versuchsaufbau und die Geometrie der jeweiligen Leuchten bedingt sind. Die Reflexionen sind hierbei innerhalb und außerhalb der zu der Lichtfunktion zugehörigen Flächen zu sehen. Welche Auswirkungen diese Reflexionen auf die Probandenbewertung und die Korrelationsanalyse nimmt, wird im Folgenden genauer untersucht.

Bei den Frontleuchten sind diese Reflexionen auf den leuchtenden der Lichtfunktion zugehörigen Flächen nicht sichtbar (siehe Abbildungen 5.29 und 5.30). Dies liegt in der Geometrie der Scheinwerfer begründet, da sich die Lichtleitringe tief versetzt im Scheinwerfer befinden und daher besser vor Fremdlicht abgeschattet sind. Ein weiterer Grund ist, dass die Ringe und der Lichtstab der Akzentleuchte im Gegensatz zu den Heckleuchten eine relativ ebene

Lichtfläche und keinen dreidimensionalen Körper darstellen, der aus mehreren Richtungen

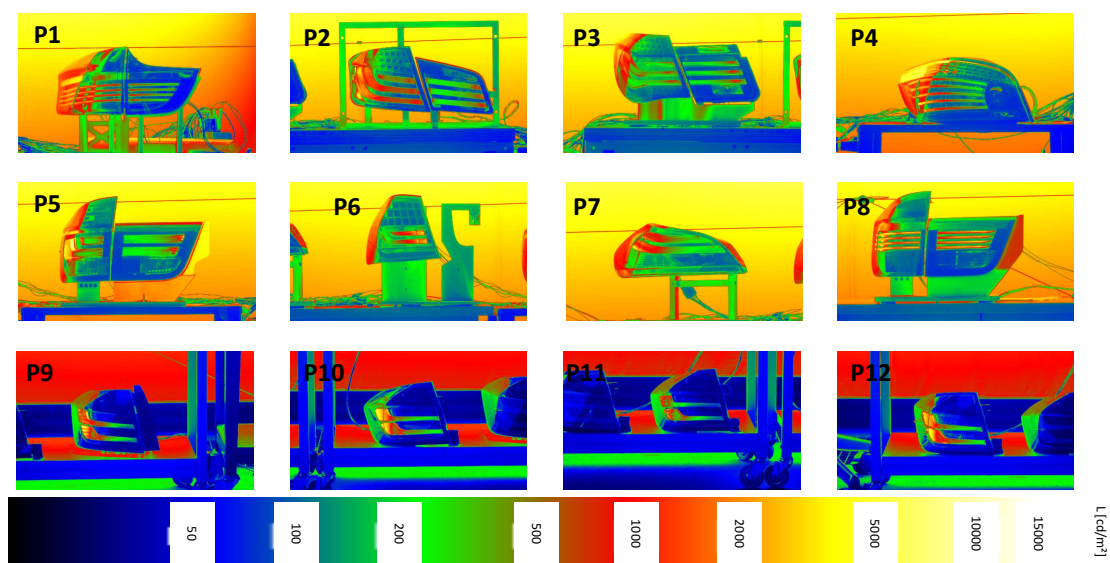


Abbildung 5.28: Leuchtdichteaufnahmen der verwendeten Heckleuchten aus der HV-Richtung vor der Tageslichtwand - mittlere Umgebungslichthelligkeit $L_B \approx 7600 \text{ cd/m}^2$

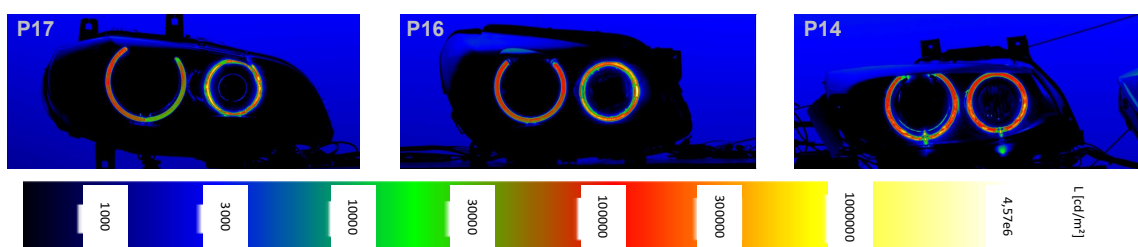


Abbildung 5.29: Leuchtdichteaufnahmen der verwendeten Scheinwerfer im Tagfahrlichtbetrieb aus der HV-Richtung vor der Tageslichtwand - mittlere Umgebungslichthelligkeit $L_B \approx 7600 \text{ cd/m}^2$

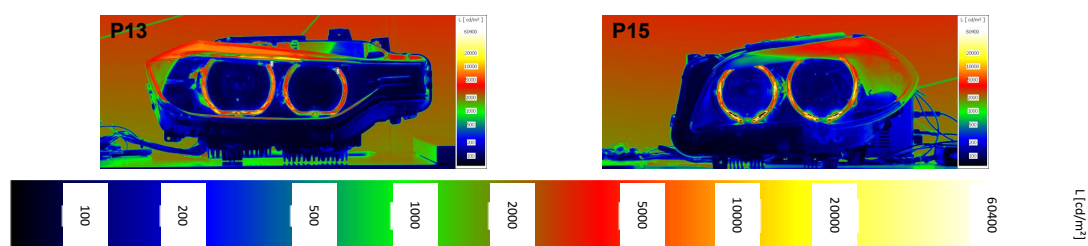


Abbildung 5.30: Leuchtdichteaufnahmen der verwendeten Scheinwerfer im Positionslichtbetrieb aus der HV-Richtung vor der Tageslichtwand - mittlere Umgebungslichthelligkeit $L_B \approx 7600 \text{ cd/m}^2$

Ergänzend zu den Leuchtdichtebildern sind in Abbildung 5.31 die mittleren Leuchtdichten aller Regionen der verwendeten Frontleuchten im Balkendiagramm darstellt. Die Leuchten P14, P16 sowie P17 werden im Tagfahrlicht- und die Leuchten P13 und P15 im Positionslichtmodus betrieben. Dieses Vorgehen bietet wegen der großen Helligkeitsunterschiede der Positions- und Tagfahrlichtfunktion die Möglichkeit, die Abhängigkeit der Gütekriterien von der Leuchtenhelligkeit zu untersuchen.

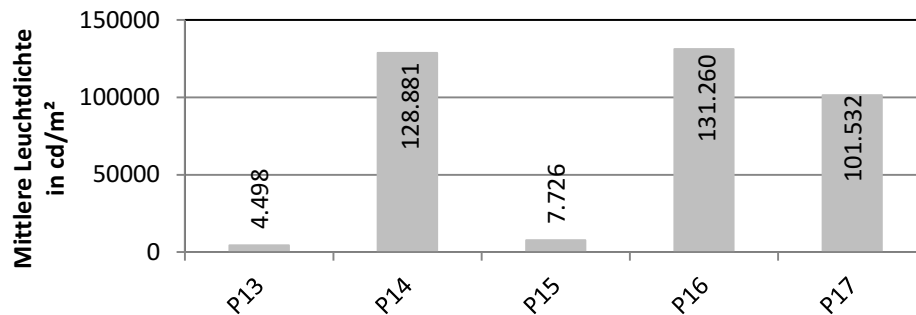
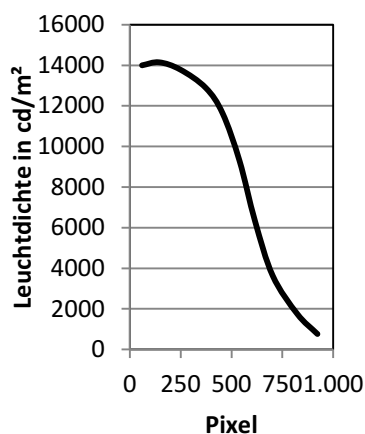
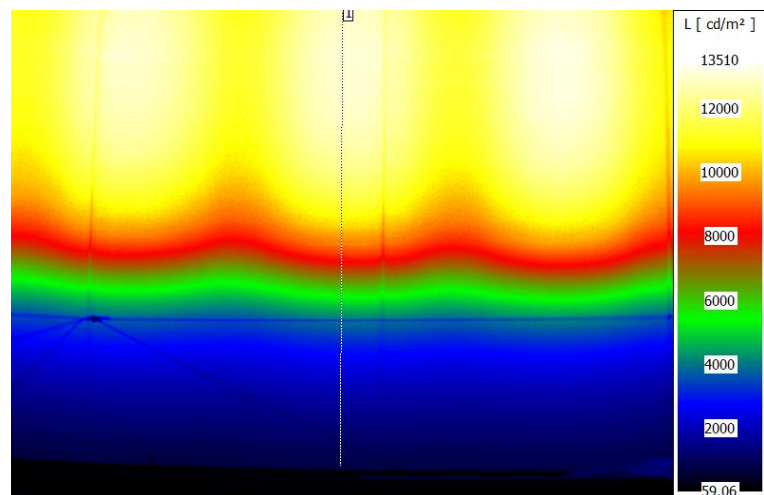


Abbildung 5.31: Mittlere Leuchtdichte der verwendeten Frontleuchten aus der HV-Richtung bei dunklen Umgebungsbedingungen

In Abbildung 5.32 ist die Umgebungshelligkeit unter Versuchsbedingungen in Form einer Leuchtdichteaufnahme sowie durch die Leuchtdichtewerte eines vertikalen Schnitts innerhalb der Aufnahme visualisiert. Das Versuchsszenario besitzt eine mittlere Umgebungshelligkeit von $\approx 7600 \text{ cd/m}^2$. Wie in Abbildung 5.32 gezeigt, ist der Helligkeitsverlauf analog zu einer realen Straßenszene so gestaltet, dass die Helligkeit oberhalb eines virtuellen Horizonts zunimmt und unterhalb abnimmt.



(a) Schnitt der Leuchtdichteverteilung



(b) Aufnahme der Leuchtdichteverteilung

Abbildung 5.32: Umgebungshelligkeitsbedingungen durch die Tageslichtsimulation

5.3.4 Versuchsprotokoll und –durchführung

Mit Hilfe des Validierungsversuchs wurden über 442 Probandenergebnisse zur Empfindung von Inhomogenitäten bei zwölf verschiedenen Heckleuchten und fünf verschiedenen Frontleuchten unter photopischen Umgebungsleuchtdichtebedingungen ermittelt.

Die Probanden bewerteten nach einer geeigneten Adaptationszeit von zehn Minuten nacheinander zunächst die Heckleuchten und anschließend die Frontleuchten. Hierbei erfolgte die Bewertung der Probanden ausschließlich in der frontalen Betrachtungsrichtung auf einem Stuhl sitzend aus einer Entfernung von 4 m.

An dem Versuch nahmen insgesamt 26 Personen im Alter von 20 bis 58 Jahren teil. Für den Teilnehmerkreis und die Fragestellung galten dieselben Randbemerkungen wie in den vorherigen Versuchen (vgl. Abschnitt 5.1.6). Die Rahmenbedingungen des Versuchs sind zusammenfassend in Tabelle 5.6 dargestellt.

Tabelle 5.6: Zusammenstellung der Rahmenbedingungen zu den Validierungsuntersuchungen mit realen Heck- und Frontleuchten unter tageslichtähnlichen Bedingungen

Rahmenbedingungen der Untersuchungen	
Anzahl verschiedener Leuchten	17 Stück
Eingesetzte Heckleuchten	8 Serienleuchten (P1-8) 4 Vorserienleuchten (P9-12)
Eingesetzte Frontleuchten	5 Serienleuchten (P13-17)
Mittlere Leuchtdichte 0°	420 cd/m ² bis 131000 cd/m ²
Maximale Leuchtdichte 0°	3500000 cd/m ²
Umgebungsleuchtdichte	≈ 7600 cd/m ²
Horizontale Blickrichtung der Testpersonen	0°
Dauer des Versuchs	30 – 40 Minuten
Anzahl Versuchspersonen	26
Altersgruppe der Probanden	20 – 58 Jahre

5.3.5 Vorstellung der Ergebnisse

Abbildungen 5.33 und 5.34 zeigen die Ergebnisse der Probandenstudie aus den Validierungsversuchen unter tageslichtähnlicher Umgebungsbedingungen. Neben den Ergebnissen aus der Tageslichtsimulation sind in Abbildung 5.33 zusätzlich die Probandenergebnisse aus Abschnitt 5.2.5 für die frontalen Betrachtung in einer dunklen und einer beleuchteten Umgebung dargestellt. Damit eine Vergleichbarkeit auf einem Blick gegeben ist, ist die Bezeichnung der jeweiligen Leuchten in beiden Versuchsreihen identisch. Analog zu Abschnitt 5.2.5 ist auf der y-Achse der Mittelwert der Probandenbewertung dargestellt. In Abbildung 5.34 sind ausschließlich die Ergebnisse zu den Frontleuchten dargestellt.

Abbildung 5.33 zeigt, dass sich nach den ausgewerteten Probandenergebnissen unter tageslichtähnlichen Umgebung sowohl homogene als auch inhomogene Heckleuchten im Leuchtenkollektiv befinden. Unter tageslichtähnlichen Bedingungen werden die dargebotenen Heckleuchten bis auf bei zwei Ausnahmen (P10 und P12) tendenziell schlechter bewertet als in dunklen Umgebungsbedingungen. Dies kann damit erklärt werden, dass der Schwellenkontrast C_{th} mit der Erhöhung der Umfeldleuchtdichte L_U gemäß Adrians und Kokoschkas Modell im Allgemeinen abnimmt [58].

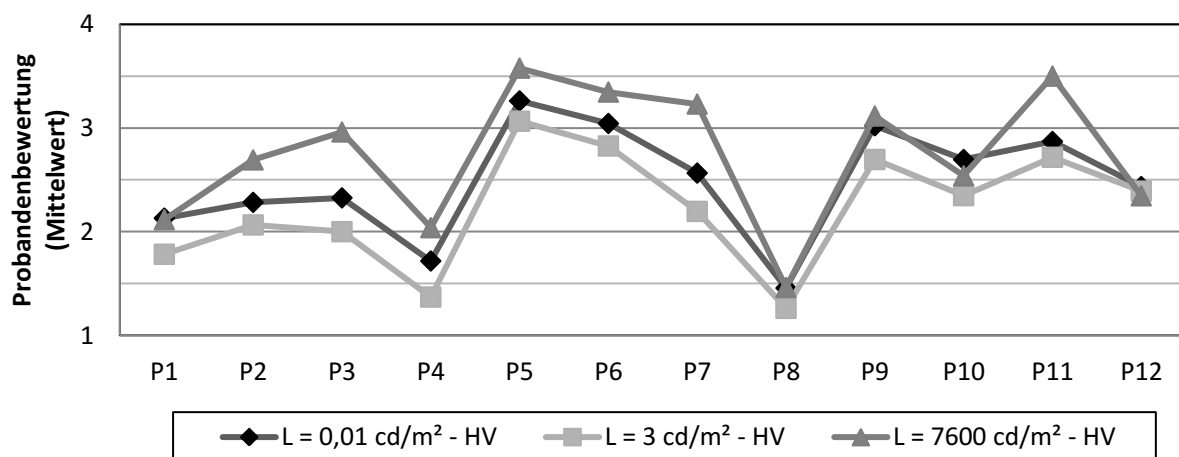


Abbildung 5.33: Mittelwert und Standardabweichung der Probandenbewertung für die Heckleuchtenkombination

Da diese Tendenzen in Form der veränderten Probandenbewertung zu einer Heckleuchte nicht besonders groß sind, kann in diesem Falle nicht von einer eindeutigen Signifikanz gesprochen werden.

In Abbildung 5.34 zeigt sich, dass das Versuchskollektiv der Frontleuchten sowohl homogene als auch inhomogene Leuchten in beiden Kategorien der Lichtfunktionen (Positions- und Tagfahrlicht) umfasst. Somit kann im nächsten Schritt auch eine sinnvolle Korrelationsanalyse mit den fünf verwendeten Frontleuchten durchgeführt werden.

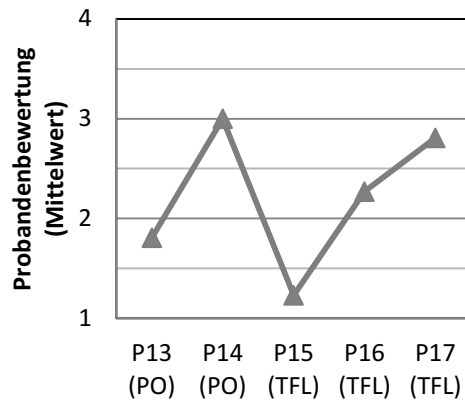


Abbildung 5.34: Mittelwert und Standardabweichung der Probandenbewertung für die Frontleuchtenkombination

5.3.6 Korrelationsanalyse

Abbildungen 5.35(a) und (b) zeigen separat für die Front- und die Heckleuchten das Ergebnis der Korrelation der subjektiven und objektiven Probandenbewertungen in Abhängigkeit des Gütekriteriums GK_8 , welches durch die vorherigen Versuche als das am besten geeignete Kriterium bestätigt worden ist. Da das Bestimmtheitsmaß R^2 in der Abbildung 5.35(a) mit einem Wert von $R^2 \approx 0,57$ eine ähnliche Größenordnung wie bei den vorherigen Versuchen mit den Heckleuchten aus Abschnitt 5.2.6 annimmt und die Verteilung der Ergebnisse um die Trendlinie geringfügig streut, ist das Gütekriterium GK_8 ebenfalls für die Bewertung von weißen Lichtfunktionen geeignet.

Im Gegensatz zu den vorherigen Ergebnissen ist das Bestimmtheitsmaß R^2 bei den Heckleuchtenversuchen unter tageslichtähnlichen Bedingungen deutlich gesunken (siehe Abbildung 5.35(b)). Die Werte streuen hierbei in einem viel größeren Maße um die approximierte Trendlinie. Daher ist ein eindeutiger Grenzwert nicht ausreichend robust definierbar.

Inwiefern das Gütekriterium auch für die Verwendung unter tageslichtähnlichen Randbedingungen geeignet ist, wird daher im Folgenden analysiert. In Abschnitt 5.3.4 wurde festgestellt, dass die Probandenbewertung unabhängig von Umgebungshelligkeitsbedingungen nahezu identisch sind. Deshalb wird im nächsten Schritt untersucht, inwieweit der Tageslichtsimulator Einfluss auf die Zahlenwerte der Gütekriterien nimmt. Eine Betrachtung der Gütekennzahlen und ortsauflösenden Leuchtdichtebilder zeigt, dass bei sechs von zwölf vermessenen Heckleuchten deutliche Reflexionen an verschiedenen Stellen der Leuchten (vornehmlich an der äußeren Seite der Seitenwandleuchte) zu erkennen sind. Diese Reflexionen bzw. Fremdlichter verursachen in derselben vermessenen Heckleuchte eine deutliche Abweichung von einem Zahlenwert größer als 0,02 für das Gütekriterium GK_8 . Somit wird das kamerabasierte Messsystem durch die Reflexionen beeinflusst. Der Mensch ist jedoch in der Lage, eine Homogenitätsbewertung

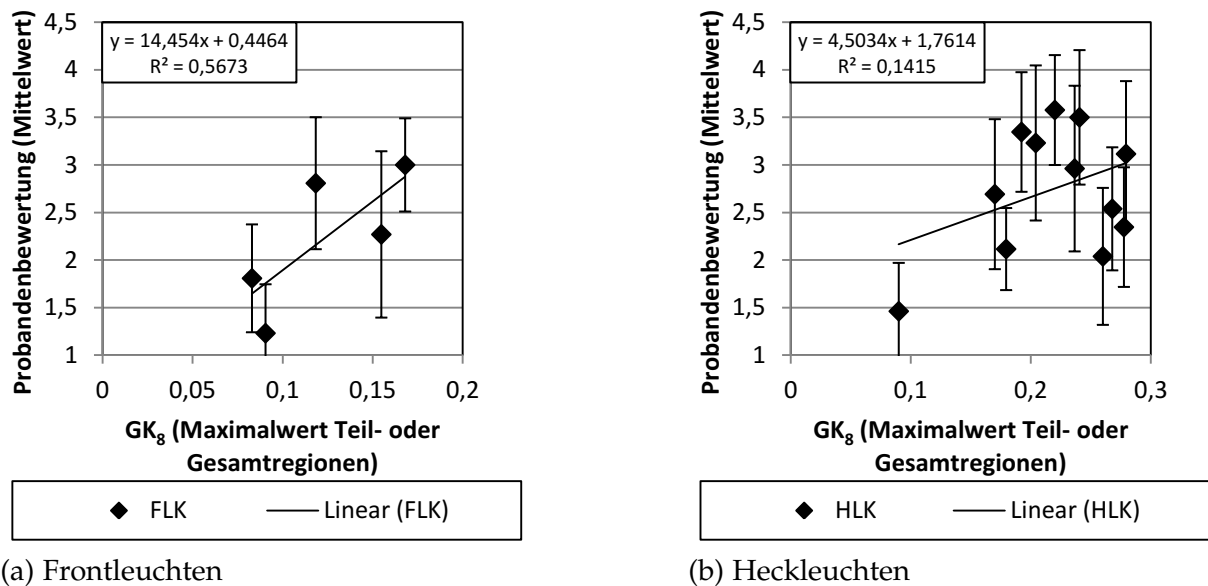


Abbildung 5.35: Korrelationsanalyse Validierungsversuch: Tageslichtähnliche Umgebung ($L_B \approx 7600 \text{ cd/m}^2$) - Gütekriterium GK_8

unabhängig von einem Fremdlicht durchzuführen. Im Rahmen dieser Arbeit wird angenommen, dass dies durch in die Form- und Farbempfindung des Menschen begründet werden kann. Vor allem kann er unterscheiden, ob das Licht zur Leuchte gehört oder ob es von der Umwelt verursacht wurde.

Aus den genannten Gründen wird die Korrelationsanalyse erneut ohne die Heckleuchten durchgeführt, deren Gütekriterium GK_8 eine größere Abweichung als 0,02 zur vorherigen Leuchtdichtemessung aus Abschnitt 5.2 besitzt (siehe Abbildung 5.36). Neben den Probandenergebnissen aus dem Versuch unter tageslichtähnlichen Umgebungsbedingungen sind die Ergebnisse aus dem Versuch aus Abschnitt 5.2.6 integriert. Die Abkürzung (d) kennzeichnet hierbei die Ergebnisse der dunklen Umgebungsbedingungen und die Abkürzung (tg) der hellen Umgebungsbedingungen aus der Tageslichtsimulation. Es zeigt sich, dass das Korrelationsmaß R^2 durch die Nichtberücksichtigung der sechs Heckleuchten einen deutlich höheren Wert von $\approx 0,43$ aufweist. Der Vergleich der beiden Trendlinien verdeutlicht, dass die Trendlinien unter nacht- und tageslichtähnlichen Bedingungen nahezu identisch sind. Somit wird die Annahme getroffen, dass das Gütekriterium GK_8 unabhängig von der Umgebungshelligkeit verwendet werden kann, solange keine Fremdlichtquellen Reflexionen auf einer zu vermessenden Leuchte hervorrufen.

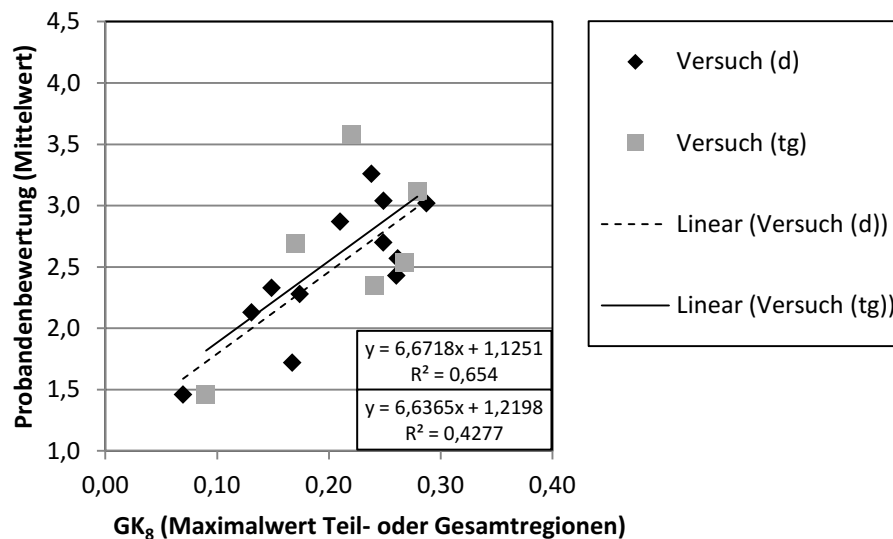


Abbildung 5.36: Korrelationsanalyse Validierungsversuch: Vergleich zwischen dunkler und tageslichtähnlicher Umgebung

5.3.7 Grenzwertermittlung

Ausgehend von den Ergebnissen aus Abbildungen 5.35 und 5.36 erfolgt analog zu dem in Abschnitt 5.1.9 definierten Verfahren die Bestimmung von Grenzwerten für die Bewertungsschwelle eine Inhomogenität ist „eindeutig wahrnehmbar“. Die Ergebnisse der Grenzwertbestimmung für GK_8 sind Abbildung 5.37 dargestellt. Für eine Vergleichbarkeit aller ermittelten Grenzwerte sind in Abbildung 5.37 neben den Zahlenwerten aus den Versuchen mit der Tageslichtsimulation zusätzlich die Grenzwerte für alle lokale Inhomogenitätsklassen aus den WES-Versuchen sowie für die frontale Betrachtung der realen Heckleuchten in einer dunklen Umgebung gegenübergestellt.

Für die Homogenitätsbewertung der Heckleuchten unter tageslichtähnlichen Bedingungen ergibt sich hierfür ein Grenzwert für GK_8 von $\approx 0,19$. Dieser Wert ist um 0,02 geringer als der ermittelte Wert aus Abschnitt 5.2.7 und spiegelt die Tendenz einer geringfügig strengeren Homogenitätsbewertung wider.

Die Bestimmung des Grenzwerts für die Frontleuchten ergibt einen Zahlenwert von $\approx 0,14$, welcher deutlich niedriger als der für die Heckleuchten ermittelte Wert ist. Diese Beobachtung kann analog zu Abschnitt 5.2.8 mit dem Kontrast-Effekt begründet werden, da bei Scheinwerfern im Gegensatz zu Heckleuchten die umgebenen Flächen homogen und unstrukturiert ist (vgl. Abbildungen 5.28 bis 5.30).

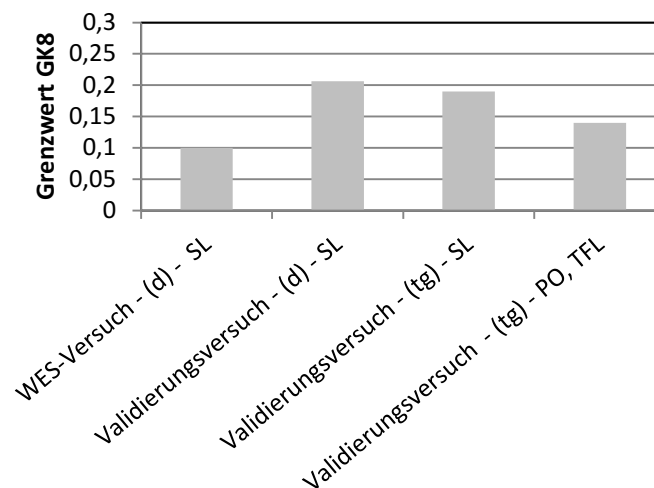


Abbildung 5.37: Grenzwert für GK_8 für alle Validierungsversuche und WES-Versuche

5.3.8 Diskussion der Ergebnisse

Im Zuge des Validierungsversuchs unter tageslichtähnlichen Bedingungen wurde eine Objektivierung der Homogenitätsbewertung gleichermaßen mit Front- und Heckleuchten durchgeführt. Das Versuchskollektiv umfasst gemäß der subjektiven Probandenbewertung sowohl homogene als auch inhomogene Front- und Heckleuchten. Die subjektiven Probandenbewertungen der zwölf verwendeten Heckleuchten unter tageslichtähnlichen Bedingungen entsprechen im Mittel nahezu den Bewertungen unter nachtähnlichen Bedingungen. Es ist zwar eine kleine Tendenz zu einer strengeren Homogenitätsbewertung unter tageslichtähnlichen Bedingungen gegeben, jedoch kann nur bei drei der zwölf Leuchten ein deutlicher Unterschied ermittelt werden.

Die objektive Bewertung in Form der kamerabasierten Erfassung der Heckleuchten wird durch die Reflexionen auf sechs von zwölf dargebotenen Leuchten stark beeinflusst. Die ermittelten Zahlenwerte der Kriterien weichen unter tageslichtähnlichen Bedingungen deutlich von den in einer dunklen Umgebung bestimmten Werten ab. Werden diese sechs Leuchten bei der Korrelationsanalyse nicht berücksichtigt, kann mit dem Gütekriterium GK_8 ein ähnliches Bestimmtheitsmaß wie beim vorherigen Validierungsversuch aus Abschnitt 5.2.7 erzielt werden. Unabhängig von einer Nichtberücksichtigung oder Berücksichtigung der sechs Leuchten kann die Aussage getroffen werden, dass mit der Ermittlung von GK_8 bei Nacht auch die subjektive Homogenitätsbewertung des Menschen am Tag vorhersagbar ist.

Eine Betrachtung der ermittelten Grenzwerte GW_{8-LG} für Front- und Heckleuchten zeigt, dass diese deutlich voneinander abweichen (0,14 und 0,19). Der Grenzwert GW_{8-LG} für die Bewertung der Heckleuchten ist in einer tageslichtähnlichen Umgebung im Gegensatz zu einer

nächtlichen Umgebung leicht um 0,02 gesunken. Dies impliziert eine strengere Probandenbewertung, die mit einer höheren Unterschiedsempfindlichkeit bei einer helleren Umgebung erklärt werden kann.

Der niedrige Wert bei den Frontleuchten kann analog zu Abschnitt 5.2.8 mit der geringeren Komplexität des Sehobjekts und dem Kontrasteffekt begründet werden. Die leuchtenden Flächen der Front- und Heckleuchten nehmen geometrisch ungefähr dieselben Dimensionen an. Front- und Heckleuchten unterscheiden sich jedoch darin, dass bei den Frontleuchten nur zwei weiß leuchtende Flächen in Form von Ringen aneinandergrenzen und der Hintergrund bzw. die Umgebung um die Ringe aufgrund der Projektionsmodullinsen des Abblendlichts unstrukturiert ist. Eine weitere mögliche Ursache für die deutlichere Verschärfung der Grenzwerte zwischen Front- und Heckleuchten kann die Farbe der Lichtfunktionen sein. Da jedoch dieselben Beobachtungen der niedrigeren Grenzwerte in den WES-Versuchen gemacht werden konnten, wird diese Annahme nicht weiterverfolgt. Somit konnte mit Hilfe der Validierungsversuche mit den Frontleuchten ebenfalls erwiesen werden, dass Beobachter Leuchten mit klar abgegrenzten und unstrukturierten Hintergrundflächen hinsichtlich der Homogenitätsbewertung kritischer bewerten.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Aufgrund der immer weiteren Verbreitung von flächigen Signalfunktionen mit einem homogenen Erscheinungsbild und derzeitigen Kommunikationsschwierigkeiten in der Anforderungsspezifikation wurden Untersuchungen zur Bewertung der Homogenität im Hinblick auf wahrnehmbare Farb- und Helligkeitsunterschiede in Kraftfahrzeugsbeleuchtungskomponenten durchgeführt.

Zunächst wurden die allgemeinen Anforderungen an die lichttechnischen Komponenten ermittelt. Die Entwicklung von lichttechnischen Komponenten stellt einen Zielkonflikt aus Kosten, Ästhetik, Funktion und Gesetz dar. Für jedes Fahrzeug wird der Zielkonflikt in Form eines Kompromisses aufgelöst. Die Homogenität ist ein wichtiger Aspekt für die ästhetischen und funktionalen Anforderungen.

Grundsätzlich beschreibt die Homogenität eine Eigenschaft einer Leuchte, die in mehrere Dimensionen aufgeteilt werden muss. Hierbei wird zwischen einer örtlichen und zeitlichen Homogenität unterschieden. Der besondere Fokus in dieser Arbeit richtet sich auf die örtliche Homogenität, welche sowohl durch die Helligkeit als auch durch die Farbe beeinflusst werden kann.

Eine genauere Analyse von Inhomogenitäten zeigt, dass verschiedene Arten mit unterschiedlichen qualitativen Eigenschaften bei automobilen Signalleuchten vorzufinden sind. Dabei kann im ersten Schritt zwischen lokalen und globalen Inhomogenitäten unterschieden werden. Unter lokalen Inhomogenitäten sind z.B. Verläufe, Struktur und Flecken innerhalb einer Teilfläche einer Signalfunktion, wie einen Lichtleitring, zu verstehen. Globale Inhomogenitäten stellen Unterschiede zwischen Teilflächen dar.

Die Aufmerksamkeit von Fahrer und Kunden führt in bestimmten Situationen zu einer gesteigerten Bedeutung der Homogenität. Eine Analyse zeigt, dass die kritischsten Bewertungsszenarien die Betrachtung von Signalleuchten in einem Verkaufsraum, im stehenden Verkehr sowie beim Ver- und Entriegeln des Fahrzeugs sind, da in diesen Fällen ein Beobachter sehr viel Zeit zur genauen Betrachtung einer Leuchte hat. Aus den genannten Situationen wurden für die weiteren Untersuchungen typische Beobachtungswinkel und -entfernungen für die Homogenitätsbewertung abgeleitet. Als Betrachtungsentfernung zwischen einer im Fahrzeug befindlichen Person und einem vorausfahrenden Fahrzeug wurde ein Abstand zwischen ca. 2,2 m - 4,5 m ermittelt. Der horizontale Beobachtungswinkel variiert für die genannte Situation je nach Heckleuchte zwischen 30° bis 63°.

Im nächsten Schritt wurden analog zur physikalischen Wirkkette von der Lichterzeugung bis hin zur menschlichen Wahrnehmung die technischen Ursachen von Inhomogenitäten in einer Signalleuchte beschrieben. Gemäß dem Produktentstehungsprozess kann in konzept- und produktionsbedingte Ursachen unterteilt werden.

Als Resultat des Produktentstehungsprozess entsteht eine Leuchte samt ihrem Erscheinungsbild, das von einem Beobachter subjektiv bewertet wird. Ob die durch die verschiedenen Ursachen bedingten Inhomogenitäten als solche von Menschen wahrgenommen werden, hängt von verschiedenen Faktoren, wie dem Sehobjekt, den Helligkeitsbedingungen, Zeit und Ort und dem Beobachter ab. Dazu werden in Kapitel 2.4 die Grundlagen der visuellen Wahrnehmung erläutert. Für die Wahrnehmbarkeit von Inhomogenitäten spielen Kontraste eine wichtige Rolle.

Jedoch führt nicht jeder sichtbare Kontrast innerhalb einer Signalleuchte zu einer inhomogenen Bewertung. Daher wurden in dieser Arbeit in der Literatur bekannte und bereits verwendete sowie komplett neu entwickelte Kriterien zur robusten, objektiven Beschreibung vorgestellt.

Für die Bewertung von Farbunterschieden werden analog zu MacAdams Herangehensweise Ellipsen als Gütekriterien vorgeschlagen, die mit Hilfe von fünf aus Untersuchungen ermittelten Farbtönen mit Hilfe eines Verfahrens auf Basis des kleinsten quadratischen Fehlers ermittelt wurden.

Für die objektive Beschreibung von helligkeitsbedingten Inhomogenitäten wurden insgesamt zwölf Gütekriterien auf der Grundlage von statischen Bewertungsmethoden, schwerpunkt- und kontrastmodellbasierten Methoden vorgestellt und im weiteren Verlauf hinsichtlich einer Verwendbarkeit für eine Homogenitätsbewertung geprüft.

Die Untersuchungen zur Bewertung der Homogenität von Signalleuchten wurden in zwei Hauptblöcke gegliedert, welche sich in Untersuchungen zur Farbbewertung und zur Helligkeitsbewertung unterteilen. Ziel der Untersuchungen war es zunächst ein geeignetes Gütekriterium mit einem hohen Bestimmtheitsmaß aus der Korrelation von subjektiven Probandenbewertungen und objektiven Messdaten durch ortsauflösende Leuchtdichtemessungen sowie spektrale Farbmessungen für die Bewertung der Homogenität zu finden. Anschließend wurden mit Hilfe der geeigneten Gütekriterien Grenzwerte zur robusten und objektivierten Bewertung der Homogenität ermittelt, um die Homogenität von Signalleuchten in jeden Prozessschritt innerhalb des Produktentstehungsprozesses bewerten zu können

Das Konzept der beiden Versuchsblöcke wurde in beiden Fällen so gestaltet, dass die Inhomogenitäten im ersten Schritt mit Hilfe von speziellen Simulatoren dargestellt und im zweiten Schritt die Ergebnisse nochmals mit realen Signalleuchten validiert wurden.

Mit Hilfe des Positionslicht-Warmerscheinungsbildsimulators war es erstmals möglich, eine sehr große Anzahl von Farbkombinationen im ECE-Weiß-Bereich innerhalb eines mit Lichtleitringen bestückten Scheinwerfers auf einem Helligkeitsniveau eines Positionslichts von 200 - 300 cd/m²

reproduzierbar zu generieren. Aus den über 38.000 Probandenergebnissen und den dazugehörigen Ellipsenapproximationen konnte festgestellt werden, dass Farbunterschiede zwischen Lichtleitringen durch Ellipsen gleicher Farbwahrnehmung in der CIE xy-Farbtabelle beschrieben werden können. Die im Rahmen dieser Arbeit ermittelten Ellipsen besitzen Halbachsen, die zwischen 12 - 21 mal größer sind als eine MacAdam Ellipse und eine um 11° geringere Neigung im Gegensatz zu den MacAdam Ellipsen besitzen. Die Ergebnisse aus PWS-Versuchen sind unabhängig von der Umgebungshelligkeit in einem Bereich von 0,01 bis 3 cd/m^2 und von der mittleren Leuchtdichte der Lichtleitringe in einem Bereich von 200 bis 250 cd/m^2 .

Zur Validierung der Ergebnisse aus den PWS-Versuchen wurden Versuche mit realen Serienleuchten aus der BMW 3er, 5er und 7er durchgeführt. Das Ziel dieser Untersuchungen war, die vorherigen Ergebnissen zum einen zu bestätigen und zum anderen zu prüfen, ob die ermittelten Grenzwerte ebenfalls auf andere Lichtleitergeometrien anwendbar sind. Die Ergebnisse der Validierungsversuche zeigten, dass die Grenzwerte trotz der in den PWS-Versuchen verwendeten Xenonlichtquelle der Projektoren verwendet werden können. Auch die Erhöhung der mittleren Leuchtdichte von 400 cd/m^2 auf ca. 1300 cd/m^2 und die Veränderung der Geometrie der leuchtenden Fläche hat in diesem Fall ebenfalls keinen Einfluss auf die Farbunterschiedsbewertung. Daher können die ermittelten Grenzwerte auf beliebige Geometrien im Scheinwerfer angewendet werden.

Abgeleitet aus den ermittelten Ergebnissen kann für Anwendungen mit weißen LEDs in Verbindung mit Lichtleitern hinsichtlich der Auswahl des LED-Binning die Empfehlung gegeben werden, dass die aufgespannte Fläche des LED-Binning kleiner sein sollte als die Fläche aus Abbildung 4.31 (Farbort $x=0,31355$ und $y=0,32368$). Der Flächeninhalt entspricht circa einer 6-Step MacAdam Ellipse. Für andere Farbtöne im ECE-Weißbereich wurde ein Excel Tool auf Basis der Ergebnisse aus Abschnitt 4.1.6 entwickelt, mit dem maximale Farbbinnings im ECE-Bereich für Farbtemperaturen größer 5000K berechnet werden können. Sind die eingesetzten Farbbereiche der Binningklassen größer als die empfohlene Ausdehnung ist die Wahrscheinlichkeit sehr hoch, dass Farbunterschiede innerhalb des Scheinwerfers für einen Beobachter sichtbar sind.

Zur Bewertung der helligkeitsbedingten Homogenität von Signalleuchten wurden drei Probandenuntersuchungen durchgeführt. Im ersten Versuch sind Inhomogenitäten erstmalig rein simulativ mit Hilfe eines Warmerscheinungsbildsimulators dargestellt worden. Der Simulator bietet nicht nur die Möglichkeit, gemessene reale Heckleuchten auf einem realistischen Leuchtdichteniveau in einem Bereich von 0 - 9000 cd/m^2 (in rot bis 2000 cd/m^2) darzustellen, sondern auch in der Entwicklung befindliche Prototypen, welche nur als Simulationsdaten vorliegen, realitätsnah auf einem zweidimensionalen Messschirm zu visualisieren.

In den Untersuchungen konnten insgesamt 6.200 Probandenbewertungen zu verschiedenen Inhomogenitätsklassen (z.B. Einkoppelstellen, Verläufe, Strukturen und Helligkeitsunterschiede in einzelnen Elementen) vorgenommen werden. Die 5er BMW HKL aus dem Jahre 2011 diente während der gesamten Untersuchungen als geometrische Vorlage.

Im nächsten Schritt wurde ein Prozess zur Objektivierung der Homogenität vollzogen, der auf einer Korrelationsanalyse aus subjektiven und objektiven Versuchsdaten inklusive unterschiedlichen Gütekriterien basiert. Hierbei wurden die objektiven Versuchsdaten mit Hilfe einer ortsauflösenden Leuchtdichtekamera erfasst und die Gütekriterien mit einer selbst entwickelten Software ermittelt. Der Hintergrund der Korrelationsanalyse liegt in der Annahme begründet, dass nicht jedes Gütekriterium, darunter fallen auch etablierte Kriterien, für eine robuste Homogenitätsbewertung herangezogen werden kann.

Diese Annahme wurde durch die Korrelationsanalyse bestätigt. Es zeigte sich, dass die verwendeten Gütekriterien eine große Spreizung beim Bestimmtheitsmaß ($R^2 = 0,16$ bis $0,80$) aufweisen. Auch die Bewertungsebene nimmt einen großen Einfluss auf das Bestimmtheitsmaß. Bei der Korrelationsanalyse wurden die vermessenen Heckleuchten auf einer globalen und lokalen Ebene sowie in einer Oder-Verknüpfung der beiden Antworten bewertet. Es zeigte sich, dass sich eine Erhöhung des Bestimmtheitsmaßes bei vielen Gütekriterien durch eine Oder-Verknüpfung erzielen lässt. Die höchsten Kennzahlen des Bestimmtheitsmaßes besitzt das Gütekriterium GK_8 ($R^2 = 0,82$), das auf der Berechnung von Schwerpunkten basiert.

Durch die Untersuchungen mit den verschiedenen simulierten Inhomogenitätsklassen zeigte sich, dass mit dem schwerpunktbasierten Gütekriterium die menschliche Homogenitätsbewertung unabhängig von der Technologie (Lichtleiter mit rückseitiger Prismenstruktur, glühender Körper usw.) sowie von der Inhomogenitätsklasse zuverlässig, robust und objektiviert prädiiziert werden. Um auch symmetrische Inhomogenitäten robust detektieren zu können, wird eine Aufteilung einer definierten Region eines Lichtleiters (nur bei Leuchten, die aus einem Lichtelement bestehen) und eine globale Bewertung der gesamten Leuchte empfohlen. Wie die Korrelationsanalyse belegt, kann das schwerpunktbasierte Gütekriterium genauso gut für die globalen Inhomogenitäten (z.B. dunklere Elemente) verwendet werden. So ist es nach den bisherigen Literaturrecherchen erstmalig möglich, inhomogenitätsklassenunabhängige Grenzwerte zu ermitteln.

Unter der Verwendung des schwerpunktbasierten Gütekriteriums wurden für die Versuche mit dem Warmerscheinungsbildsimulator unabhängig von Inhomogenitätsklassen für die lokalen Inhomogenitäten ein mittlerer Grenzwert von $GK_{8-LG}=0,1$ für die Bewertungsstufe „3 - deutlich wahrnehmbar“ abzüglich einer Streubreite von einer halben Bewertungsstufe ermittelt. Für die globalen Inhomogenitäten wurde für das schwerpunktbasierte Kriterium ein etwas niedriger Grenzwert von $GK_{8-G}=0,075$ ermittelt. Die beiden Grenzwerte für die lokalen und globalen Inhomogenitäten können unabhängig von einem mittleren Helligkeitsbereich der Leuchte von 230 cd/m^2 bis 830 cd/m^2 angewendet werden.

Um die Auswahl des Gütekriteriums, die ermittelten Grenzwerte und die Alltagstauglichkeit zu bestätigen, wurden im nächsten Schritt Validierungsversuche mit zwölf Heckleuchten unter nachtähnlichen Bedingungen (Umgebungsleuchtdichte $0,01 \text{ cd/m}^2$ und 3 cd/m^2) durchgeführt.

Hierbei erfolgte erneut eine Korrelationsanalyse aller vorgestellten Gütekriterien, um die Robustheit einzelner Kriterien zu überprüfen. Der Vergleich der Bestimmtheitsmaße zeigt, dass diese bei allen untersuchten Kriterien im Gegensatz zu den WES-Versuchen niedriger sind. Durch die Ergebnisse konnte zudem deutlich erwiesen werden, dass einige Gütekriterien, auch etablierte Kriterien auf Basis von statischen Bewertungsmethoden, ein sehr geringes Bestimmtheitsmaß aufweisen und somit sehr schlecht für die Homogenitätsbewertung geeignet sind. Das schwerpunktbasierte Gütekriterium hingegen erweist sich als am besten für eine robuste und objektivierte Homogenitätsbewertung geeignet. Da das Leuchtenkollektiv aus zwölf verschiedenen Leuchtengeometrien bestand, kann für das schwerpunktbasierte Gütekriterium die Anforderung bestätigt werden, dass es unabhängig von Form, Helligkeit und Ausdehnung einer Leuchte für eine robuste Voraussage der Homogenitätsbewertung eingesetzt werden kann.

Als Grenzwerte für GK_8 für die Bewertungsstufe „3 - deutlich wahrnehmbar“ wurde ein Zahlenwert von 0,21 für die frontale Beobachtung einer Leuchte in einer dunklen Umgebung ($\approx 0,01 \text{ cd/m}^2$) ermittelt. Der höhere Wert im Vergleich zu den WES-Versuch kann mit der höheren Komplexität (mehr Strukturen, größerer Dynamikumfang) und mit der Dreidimensionalität der realen Leuchten begründet werden.

Um die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf weiße Signalleuchten zu prüfen und den Einfluss der Umgebungsleuchtdichte auf den Grenzwert zu ermitteln, wurde abschließend ein weiterer Validierungsversuch mit den zuvor verwendeten zwölf Heckleuchten und fünf zusätzlichen Scheinwerfern in einer tageslichtähnlich Situation bei einer mittleren Leuchtdichte von $\approx 7600 \text{ cd/m}^2$ durchgeführt. Es zeigte sich, dass die objektive Bewertung in Form der kamera-basierten Erfassung der Heckleuchten durch Reflexionen auf den dargebotenen Heckleuchten stark beeinflusst werden kann.

Als Grenzwert für GK_8 wurde ein Zahlenwert von 0,19 für die frontale Beobachtung einer Heckleuchte bei eingeschalteter Schlusslichtfunktion in einer hellen Umgebung ($\approx 7600 \text{ cd/m}^2$) ermittelt. Der Grenzwert ist somit auf Grund der Umgebungslichtbedingung ein wenig strenger, da Schwellenkontrast C_{th} mit der Erhöhung der Umfeldleuchtdichte L_U abnimmt. Für die Frontleuchten wurde ein deutlich niedrigerer Grenzwert von 0,14 für das schwerpunktbasierte Bewertungskriterium ermittelt. Der niedrigere bzw. strengere Grenzwert wird mit der geringeren Komplexität des Sehobjekts begründet, was durch die WES-Versuche ebenfalls bestätigt wurde.

Im Rahmen dieser Dissertation wurden erstmals verschiedene Verfahren, Gütekriterien und Grenzwerte zur Bewertung der Homogenität von Signalleuchten hergeleitet und entwickelt. Diese Ideen wurden bereits in den Entwicklungsprozess der BMW Group integriert und finden jeden Tag Anwendung.

Mit den ermittelten Ergebnissen der Arbeit ist es nun erstmalig möglich, die Homogenität einer Signalleuchte in jedem Prozessschritt objektiviert bewerten zu können. Dies bietet den

Vorteil, dass Unzulänglichkeiten und Unstimmigkeiten eindeutig zwischen verschiedenen Entwicklungsprozesspartnern nicht erst am Ende, sondern zu Beginn und während einer Produktentstehung aufgelöst werden können. So können Entwicklungskosten und -zeit eingespart werden.

Die Dissertation liefert daher einen wichtigen Beitrag dazu, die funktionalen und ästhetischen Eigenschaften von Signalleuchten stetig zu verbessern.

Zukünftig ist es erstrebenswert, einen konzernübergreifenden Standard für die Bewertung der Homogenität von Signalleuchten analog dem Technischen Komitee TC 4-45 der CIE auf Basis der hier vorgestellten Ergebnisse auszuarbeiten, damit jeder Fahrzeughersteller und Lieferant in der Entwicklungskette dieselben Voraussetzung (z.B. Verständnis, Auswertungssoftware) besitzt.

Des Weiteren sollten noch ergänzende Homogenitätsuntersuchungen durchgeführt werden, damit lokal stark begrenzte Inhomogenitäten, wie ein defektes Lichtprisma im Lichtleiter, ebenfalls robust bewertet werden können. Für die objektive Bewertung der Ergebnisse und die Erhöhung des Bestimmtheitsmaßes sollten hierfür, wie in Kapitel 2.2.1 dargestellt, auch Gütekriterien auf Basis der Raumfrequenz verwendet werden. Ein anderer Themenschwerpunkt für mögliche weitere Untersuchungen könnte darin liegen, die Unabhängigkeit des Gütekriteriums GK_8 von der Größe einer Leuchte final zu bestätigen oder zu widerlegen.

Um die Übertragbarkeit der ermittelten Farbgrenzen auf andere optische Systeme, wie Reflektoren, zu prüfen, sollten weitere Probandenuntersuchungen mit unterschiedlichen Reflektorformen und -größen sowie unterschiedlichen Leuchtdichteniveaus durchgeführt werden.

Abbildungsverzeichnis

1.1	Marktübergreifende Analyse von Tagfahrlichtikonen (Stand 2012), Fotos entnommen aus [1]	2
1.2	Marktübergreifende Analyse von Schlusslichtikonen (Stand 2012), Fotos entnommen aus [1]	2
1.3	Produktentstehungsprozess	3
1.4	Schematische Darstellung des Objektivierungsprozesses	5
2.1	Gesamthafte Übersicht der Einflussfaktoren	7
2.2	Darstellung des Trilemmas der Fahrzeugbeleuchtungsentwicklung	8
2.3	Darstellung der weltweiten Zulassungsräume [36], [76]	10
2.4	Lichtstärkeanforderung an Signalleuchten aus senkrechter Beobachtungsrichtung nach den ECE-Regelungen und FMVSS108 [36], [76]	11
2.5	Flächenanforderung an Signalleuchten nach den ECE-Regelungen und FMVSS 108 [36], [76]	12
2.6	Darstellung der Farbgrenzen nach ECE-Regelungen R6, R7 und SAE J578 [36],[103]	13
2.7	Darstellung von Typprüfzeichen	13
2.8	Lichtkomponenten an einem Fahrzeug	14
2.9	Optimale Signalleuchtdichte eines Schlusslichts in Abhängigkeit der Umfeldleuchtdichte nach Kaltenbach [53]	15
2.10	Definition der Homogenitätsdimensionen	17
2.11	Qualitative Eigenschaften von Inhomogenitäten	19
2.12	Örtliche Inhomogenitätsklassen in verschiedenen technischen Ausprägungen . .	20
2.13	Ortsauflösende Leuchtdichteverteilung von Verläufen und Strukturen am Beispiel einer BMW 3er Heckleuchte (Baujahr 2010)	21
2.14	Ortsauflösende Leuchtdichteverteilung von Flecken am Beispiel einer Heckleuchte	22
2.15	Ortsauflösende Leuchtdichteverteilung von einer geometrischen Unförmigkeit am Beispiel eines Lichtleittrings	22
2.16	Ortsauflösende Leuchtdichteverteilung von Unterschieden zwischen Teilflächen	23
2.17	Veranschaulichung der alltäglichen Bewertungsszenarien der Homogenität [15]	24
2.18	Einflussfaktoren für die Entstehung von Inhomogenitäten	25
2.19	Explosionsdarstellung einer Heckleuchte am Beispiel einer BMW 3er Heckleuchte (Baujahr 2012)	25
2.20	Farbverschiebung durch Lichtleitersysteme	27

2.21 Funktionsoptikfreie Abschlusscheiben, Fotos entnommen aus [1]	28
2.22 Schematische Darstellung eines Reflektionssystems (a) und Anwendung bei einem BMW Z4 (b)[101]	29
2.23 Auswirkung der Anzahl der Facetten auf die Homogenität	29
2.24 Kissenlinsensystem in schematischer und fotografischer Darstellung (entnommen aus [101])	30
2.25 Lichtleitsystem in schematischer und fotografischer Darstellung	31
2.26 Ortsauflösende Leuchtedichtevertelung von Lichtleitern in senkrechter und seitlicher Beobachtungsrichtung	32
2.27 Glühende Körper in schematischer und fotografischer Darstellung	32
2.28 Auswirkungen des Befestigungskonzepts auf die Homogenität eines Lichtleiters	33
2.29 Schematischer Aufbau einer 2-pc-LED [73]	36
2.30 Vergleich der spektralen Anteilen baugleicher Weiß-LED aus einer Binningklasse	37
2.31 Farbwertanteiländerung Δx und Δy von LEDs in Abhängigkeit des Abstrahlwinkels [40]	37
2.32 Schematische Darstellung einer weißen LED mit unterschiedlichen Konvertergeometrien	38
2.33 LED Farbbinning verschiedener Hersteller nach [85], [84], [80], [79], [23], [36] . .	39
2.34 Verteilung der Farborte innerhalb eines definierten Farbbinnings von verschiedenen Produktionschargen einer weißen LED [24]	40
2.35 Änderung der photometrischen Eigenschaften einer LED am Beispiel der Osram Ostar [40]	42
2.36 Simulation der Auswirkungen der Positionierungstoleranzen am Beispiel eines Lichtleiters und einer LED	43
2.37 Erscheinungsbild von Lichtleitern in Abhängigkeit der produzierten Einheiten .	44
2.38 Fotografische Darstellung von Umwelteinflüssen	45
2.39 Menschlicher Wahrnehmungsprozess nach Goldstein [43]	46
2.40 Einflussfaktoren für die Erkennung von Inhomogenitäten	47
2.41 Schematische Darstellung des Auges (a) und Schnitt durch die Netzhaut (b) nach [48]	48
2.42 Verteilung von Zapfen und Stäbchen auf der Netzhaut in Abhängigkeit des Winkels [82]	48
2.43 Relative spektrale Empfindlichkeitskurven für das Tag- und Nachtsehen [26] . .	49
2.44 Binokulares Gesichtsfeld nach Eckert [33]	50
2.45 Skizze des Adaptationskegel für die Bestimmung der Adaptationsleuchtdichte .	51
2.46 Öffnungswinkel verschiedener Heckleuchten in einer Entfernung von 4 m . . .	52
2.47 Messung der Adaptationsleuchtdichte im nächtlichen Straßenverkehr in einer Kolonnensituation	53
2.48 Normspektralfunktionen für den 2°-Normalbeobachter [29]	55

2.49	Kontrastpolarität eines einfachen Testobjekts (links: Positivkontrast, mittig: Tarnung, rechts: Negativkontrast)	57
2.50	Schwellenleuchtdichte in Abhängigkeit des Sehwinkels nach Adrian [2] (entnommen aus [53])	58
2.51	Lokale Kontrastunterschiede nach Kokoschka [55] (entnommen aus [32])	61
2.52	Sehschärfe von dunklen Landoltringen in Abhängigkeit von der Umfeldleuchtdichte L_u und des Kontrasts c [57]	62
2.53	Definition und Testobjekt zur Bestimmung der Sehschärfe	63
2.54	Beispiele für die Leistungsfähigkeit der menschlichen Formempfindung, links: verschiedene Texturen; rechts: Darstellung zweier Balken analog eines Kanizsa-Dreiecks	63
2.55	Optische Täuschungen	64
2.56	Linsen verschieden alter Menschen: a) 6 Monate, b) 8 Jahre, c) 12 Jahre, d) 25 Jahre, e) 47 Jahre, f) 60 Jahre, g) 70 Jahre, h) 82 Jahre, i) 91 Jahre, nach [64] entnommen aus [54]	66
3.1	Darstellung von globalen und lokalen Bewertungsregionen	68
3.2	10-fach vergrößerte MacAdam Ellipsen nach [65] (entnommen aus [52])	69
3.3	Beispielhafte Darstellung der Auswirkungen der Eingangsfarbartverteilung auf die Ellipsenapproximation	72
3.4	Auswirkung der Orientierung der leuchtenden Flächen auf die Bestimmung von Gradienten	77
3.5	Messregionen zur Bestimmung der Schwerpunkts S_{pn} , S_{gn} einer leuchtenden Fläche	78
3.6	Prozess zur Bestimmung des Visibility Levels	79
3.7	Berechnetes Visibility Level auf Basis des Adrian-Modells und des Kokoschka-Modells am Beispiel der BMW 3er HKL Baujahr 2010 - 1	82
3.8	Berechnetes Visibility Level auf Basis des Adrian-Modells und des Kokoschka-Modells am Beispiel der BMW 3er HKL Baujahr 2010 - 2	82
4.1	Schematischer Aufbau des Positionslicht-Warmerscheinungsbildsimulators	85
4.2	Schematische Darstellung der verwendeten Messtechnik	86
4.3	Leuchtdichteverteilung des Warmerscheinungsbildsimulators mit einer R=255, B=255, G=255 Einstellung in einem Betrachtungswinkel von 30° nach 180 min.	87
4.4	Stark vergrößerte ortsauflösende Farbaufnahme eines Lichtleiters	87
4.5	Gegenüberstellung der Messergebnisse zur Farbigkeit von Lichtleitringen von verschiedenen Messgeräten	88
4.6	Farbartänderung in Abhängigkeit der unifarbigen Ansteuerung	89
4.7	Gamut beider Projektionssysteme inklusive des optischen Systems in der CIE xy-Farbtabelle	90
4.8	Mittlere Leuchtdichte der Primärfarben des äußeren und inneren Rings	91

4.9	Teilnehmerstruktur der Probandenstudie	92
4.10	Referenzfarborte in den PWS-Versuchen im CIE xy-Farbraum [84]	94
4.11	Darstellung der Vergleichfarborte des äußeren Positionslichttrings aus dem Teilversuch 1 in der CIE u'v'-Farbtafel	95
4.12	Darstellung der Probandenergebnissen aus Teilversuch 1 mit dem PWS in der CIE xy-Farbtafel	99
4.13	Darstellung der Farbortgrenzwerte und der approximierten Ellipse von Teilversuch 1 in der CIE xy-Farbtafel	101
4.14	Darstellung des durchschnittlichen, minimalen und maximalen Fehlers (\bar{e}_{Median} , e_{min} , e_{max}) für alle Teilversuche	102
4.15	Darstellung des extrapolierten Ellipsenparameters a aus den Ergebnissen mit dem PWS	102
4.16	Darstellung des extrapolierten Ellipsenparameters b aus den Ergebnissen mit dem PWS	103
4.17	Darstellung des extrapolierten Ellipsenparameters φ in Radiant aus den Ergebnissen mit dem PWS	103
4.18	Vergleich der PWS-Ergebnisse mit anderen Ergebnissen zur Bewertung von Farbunterschieden [117], [74]	105
4.19	Darstellung der Versuchsscheinwerfer des Validierungsversuchs (Fotos zum Teil entnommen aus [1])	106
4.20	Farborte des Positionslichts des BMW 5er Scheinwerfers	108
4.21	Farborte der LED-Lichtquellen des BMW 5er Scheinwerfers	108
4.22	Farborte des Positionslichts des BMW 3er Scheinwerfers	109
4.23	Farborte der LED-Lichtquellen des BMW 5er Scheinwerfers	110
4.24	Farborte des Positionslichts des BMW 7er Scheinwerfers	110
4.25	Teilnehmerstruktur der Probandenstudie der Validierungsversuche	111
4.26	Median der Probandenbewertung und der Fehler des Medians (Teilversuch 1)	113
4.27	Median der Probandenbewertung und der Fehler des Medians (Teilversuche 2 und 3)	114
4.28	Darstellung der Probandenergebnisse aus Teilversuch 1 mit $IR = 3C$	116
4.29	Bestimmung eines maximal zulässigen Farbbereichs	119
4.30	Bewertung von LED-Binnings in Kombination mit den ermittelten Grenzwertellipsen	121
4.31	Vergleich von Definitionen von zulässigen LED-Binnings am Farbort $x=0,31355$ und $y=0,32368$	123
5.1	Schematischer Aufbau des Warmerscheinungsbildsimulators	125
5.2	Digitalisierungsprozess von simulierten Inhomogenitäten	127
5.3	Zusammenhang zwischen den prozentualen Grundhelligkeiten und der resultierenden Leuchtdichte des WES	128

5.4	Inhomogenitätsmuster der WES Versuche: (a) Homogen (HOMOGEN03), (b) Verlauf (VERL04), (c) helle Einkoppelstelle (EK01 a)	129
5.5	Histogramm des Mittelwerts der Probandenauswertung für die 178 Darbietungs-szenarien aus den WES-Versuchen	132
5.6	Mittlere Probandenauswertung der Klasse „Homogen“	132
5.7	Mittelwert der Probandenbewertung für die niedrigste und höchste überlagerte Helligkeitsstufe (10% und 100%) der WES-Untersuchungen	133
5.8	Korrelationsanalyse WES: Nur lokale Inhomogenitätsklassen mit GK_8	135
5.9	Bestimmtheitsmaß WES: Nur lokale Inhomogenitätsklassen	136
5.10	Bestimmtheitsmaß WES: Separate Analyse der lokalen Inhomogenitätsklassen mit dem Gütekriterium GK_8	137
5.11	Korrelationsanalyse WES: Inhomogenitätsklasse EK03 Gütekriterien GK_8 und GK_9	137
5.12	Korrelationsanalyse WES: Inhomogenitätsklasse Verl04, Gütekriterien GK_8 max und global	138
5.13	Bestimmtheitsmaß WES: Globale Inhomogenitätsklassen Element01a - d	139
5.14	Grenzwertermittlung für die Inhomogenitätsklasse EK03	140
5.15	Grenzwert für GK_1 für alle lokalen Inhomogenitäten	141
5.16	Grenzwert für GK_5 für alle lokalen Inhomogenitäten	141
5.17	Grenzwert für GK_8 für alle lokalen Inhomogenitäten	142
5.18	Grenzwerte für GK_4 und GK_8 für globale Inhomogenitätsklassen	142
5.19	Schematischer Aufbau des Validierungsversuchs mit skotopischen und mesopi-schen Umfeldleuchtdichten ($0,01 \text{ cd/m}^2$ und 3 cd/m^2)	146
5.20	Leuchtdichteaufnahmen der verwendeten Heckleuchten aus der HV-Richtung bei dunklen Umgebungsbedingungen	147
5.21	Mittlere Leuchtdichte der verwendeten Heckleuchten aus der HV-Richtung bei dunklen Umgebungsbedingungen	147
5.22	Mittelwert der Probandenbewertung aus den Validierungsversuchen	150
5.23	Bestimmtheitsmaß Validierungsversuch: Alle Beobachtungsrichtungen und beide Umfeldleuchtdichten ($L_B \approx 0,01 - 3 \text{ cd/m}^2$)	151
5.24	Korrelationsanalyse Validierungsversuch: Dunkle Umgebung ($L_B \approx 0,01 \text{ cd/m}^2$) - Gütekriterium GK_8	152
5.25	Korrelationsanalyse Validierungsversuch: Helle Umgebung ($L_B \approx 3 \text{ cd/m}^2$) - Gütekriterium GK_8	152
5.26	Grenzwert für GK_8 für alle Beobachtungsrichtungen und Umfeldleuchtdichten von $0,01$ bis 3 cd/m^2 - „lokal oder global“ Auswertung	153
5.27	Schematischer Aufbau des Validierungsversuchs mit photopischen Umfeldleucht-dichten	157
5.28	Leuchtdichteaufnahmen der verwendeten Heckleuchten aus der HV-Richtung vor der Tageslichtwand - mittlere Umgebungslichthelligkeit $L_B \approx 7600 \text{ cd/m}^2$	158

5.29 Leuchtdichteaufnahmen der verwendeten Scheinwerfer im Tagfahrlichtbetrieb aus der HV-Richtung vor der Tageslichtwand - mittlere Umgebungslichthelligkeit $L_B \approx 7600 \text{ cd/m}^2$	158
5.30 Leuchtdichteaufnahmen der verwendeten Scheinwerfer im Positionslichtbetrieb aus der HV-Richtung vor der Tageslichtwand - mittlere Umgebungslichthelligkeit $L_B \approx 7600 \text{ cd/m}^2$	158
5.31 Mittlere Leuchtdichte der verwendeten Frontleuchten aus der HV-Richtung bei dunklen Umgebungsbedingungen	159
5.32 Umgebungshelligkeitsbedingungen durch die Tageslichtsimulation	159
5.33 Mittelwert und Standardabweichung der Probandenbewertung für die Heckleuchtenkombination	161
5.34 Mittelwert und Standardabweichung der Probandenbewertung für die Frontleuchtenkombination	162
5.35 Korrelationsanalyse Validierungsversuch: Tageslichtähnliche Umgebung ($L_B \approx 7600 \text{ cd/m}^2$) - Gütekriterium GK_8	163
5.36 Korrelationsanalyse Validierungsversuch: Vergleich zwischen dunkler und tageslichtähnlicher Umgebung	164
5.37 Grenzwert für GK_8 für alle Validierungsversuche und WES-Versuche	165
B.1 Darstellung der kritischen Entfernungen für die Homogenitätsbewertung	189
B.2 Darstellung der kritischen Winkel für die Homogenitätsbewertung	191
C.1 Leuchtdichtestabilität des PWSs	193
C.2 Stabilität des x Farbwertanteils des PWSs	194
C.3 Stabilität des y Farbwertanteils des PWSs	194
C.4 Optisches System eines D-ILA Projektors [46]	195
C.5 Querschnitt eines D-ILA Chips [46]	196
C.6 Prinzip der additiven Farbmischung	197
C.7 Darstellung des Farbmischalgorithmus	200
C.8 Darstellung der Probandenergebnisse aus Teilversuch 2 mit dem PWS in der CIE xy-Farbtafel	202
C.9 Darstellung der Probandenergebnisse aus Teilversuch 3 mit dem PWS in der CIE xy-Farbtafel	203
C.10 Darstellung der Probandenergebnisse aus Teilversuch 4 mit dem PWS in der CIE xy-Farbtafel	203
C.11 Darstellung der Probandenergebnisse aus Teilversuch 5 mit dem PWS in der CIE xy-Farbtafel	204
C.12 Darstellung der Probandenergebnisse aus Teilversuch 6 mit dem PWS in der CIE xy-Farbtafel	204
C.13 Darstellung der Probandenergebnisse aus Teilversuch 7 mit dem PWS in der CIE xy-Farbtafel	205

C.14 Darstellung der Probandenergebnisse aus Teilversuch 8 mit dem PWS in der CIE xy-Farbtafel	205
C.15 Darstellung der Probandenergebnisse aus Teilversuch 9 mit dem PWS in der CIE xy-Farbtafel	206
C.16 Darstellung der Probandenergebnisse aus Teilversuch 10 mit dem PWS in der CIE xy-Farbtafel	206
C.17 Darstellung der Probandenergebnisse aus Teilversuch 11 mit dem PWS in der CIE xy-Farbtafel	207
C.18 Darstellung der Probandenergebnisse aus Teilversuch 12 mit dem PWS in der CIE xy-Farbtafel	207
C.19 Darstellung der Probandenergebnisse aus Teilversuch 13 mit dem PWS in der CIE xy-Farbtafel	208
C.20 Darstellung der Probandenergebnisse aus Teilversuch 14 mit dem PWS in der CIE xy-Farbtafel	208
C.21 Darstellung der Farbortgrenzwerte und der approximierten Ellipse von Teilversuch 2 in der CIE xy-Farbtafel	212
C.22 Darstellung der Farbortgrenzwerte und der approximierten Ellipse von Teilversuch 3 in der CIE xy-Farbtafel	213
C.23 Darstellung der Farbortgrenzwerte und der approximierten Ellipse von Teilversuch 4 in der CIE xy-Farbtafel	213
C.24 Darstellung der Farbortgrenzwerte und der approximierten Ellipse von Teilversuch 5 in der CIE xy-Farbtafel	214
C.25 Darstellung der Farbortgrenzwerte und der approximierten Ellipse von Teilversuch 6 in der CIE xy-Farbtafel	214
C.26 Darstellung der Farbortgrenzwerte und der approximierten Ellipse von Teilversuch 7 in der CIE xy-Farbtafel	215
C.27 Darstellung der Farbortgrenzwerte und der approximierten Ellipse von Teilversuch 8 in der CIE xy-Farbtafel	215
C.28 Darstellung der Farbortgrenzwerte und der approximierten Ellipse von Teilversuch 9 in der CIE xy-Farbtafel	216
C.29 Darstellung der Farbortgrenzwerte und der approximierten Ellipse von Teilversuch 10 in der CIE xy-Farbtafel	216
C.30 Darstellung der Farbortgrenzwerte und der approximierten Ellipse von Teilversuch 11 in der CIE xy-Farbtafel	217
C.31 Darstellung der Farbortgrenzwerte und der approximierten Ellipse von Teilversuch 12 in der CIE xy-Farbtafel	217
C.32 Darstellung der Farbortgrenzwerte und der approximierten Ellipse von Teilversuch 13 in der CIE xy-Farbtafel	218
C.33 Darstellung der Farbortgrenzwerte und der approximierten Ellipse von Teilversuch 14 in der CIE xy-Farbtafel	218

D.1	Darstellung der Probandenergebnisse aus Versuch 1 mit IR = 1A	224
D.2	Darstellung der Probandenergebnisse aus Versuch 1 mit IR = 2E	224
D.3	Darstellung der Probandenergebnisse aus Versuch 1 mit IR = 2C	225
D.4	Darstellung der Probandenergebnisse aus Versuch 1 mit IR = 5E	225
D.5	Darstellung der Probandenergebnisse aus Teilversuch 2 - Referenzfarbort des äußeren Rings LI)	226
D.6	Darstellung der Probandenergebnisse aus Teilversuch 3 - Referenzfarbort des Scheinwerfers = M2)	226
E.1	Leuchtdichtestabilität des WESs	227
E.2	Darstellung der Inhomogenitätsmuster aus den WES Versuchen (KS = 100 %) .	228
E.3	Korrelationsanalyse WES: Alle Inhomogenitätsklassen außer Element01a - d - Teil 1231	
E.4	Korrelationsanalyse WES: Alle Inhomogenitätsklassen außer Element01a - d - Teil 2232	
E.5	Korrelationsanalyse WES: Alle Inhomogenitätsklassen außer Element01a - d - Teil 3233	
E.6	Korrelationsanalyse WES: Alle Inhomogenitätsklassen außer Element01a - d - Teil 4234	
F.1	Leuchtdichteaufnahmen der verwendeten Heckleuchten aus der H30-Richtung bei dunklen Umgebungsbedingungen	237
F.2	Regressionsanalyse des Validierungsversuchs: Umfeldleuchtdichte $\approx 0,01 \text{ cd/m}^2$; Beobachtungsrichtung HV	240
F.3	Regressionsanalyse des Validierungsversuchs: Umfeldleuchtdichte $\approx 0,01 \text{ cd/m}^2$; Beobachtungsrichtung H=30°	240
F.4	Regressionsanalyse des Validierungsversuchs: Umfeldleuchtdichte $\approx 3 \text{ cd/m}^2$; Beobachtungsrichtung HV	240
F.5	Regressionsanalyse des Validierungsversuchs: Umfeldleuchtdichte $\approx 3 \text{ cd/m}^2$; Beobachtungsrichtung H=30°	241
F.6	Korrelationsanalyse des Validierungsversuchs: Umfeldleuchtdichte $\approx 0,01 \text{ cd/m}^2$ und $\approx 3 \text{ cd/m}^2$; Beobachtungsrichtung H=0° und H=30° - Teil 1	242
F.7	Korrelationsanalyse des Validierungsversuchs: Umfeldleuchtdichte $\approx 0,01 \text{ cd/m}^2$ und $\approx 3 \text{ cd/m}^2$; Beobachtungsrichtung H=0° und H=30° - Teil 2	243
F.8	Korrelationsanalyse des Validierungsversuchs: Umfeldleuchtdichte $\approx 0,01 \text{ cd/m}^2$ und $\approx 3 \text{ cd/m}^2$; Beobachtungsrichtung H=0° und H=30° - Teil 3	244
F.9	Korrelationsanalyse des Validierungsversuchs: Umfeldleuchtdichte $\approx 0,01 \text{ cd/m}^2$ und $\approx 3 \text{ cd/m}^2$; Beobachtungsrichtung H=0° und H=30° - Teil 4	245
G.1	Einfluss des Kontrastpolaritätsfaktors F_{CP} nach [2] (entnommen aus [32])	247
G.2	Einfluss des Alters auf die Kontrastschwelle nach [2] (entnommen aus [32]) . . .	248

Tabellenverzeichnis

2.1	Parameter der Homogenitätsbewertungsszenarien	24
2.2	Technologievergleich zwischen einer LED und einer Glühlampe [78], [81]	34
2.3	Adaptationszustand in Abhängigkeit der Adaptationsleuchtdichte [26]	51
2.4	Öffnungswinkel zur Bestimmung der Adaptationsleuchtdichte	52
2.5	Werte P für die Pigmentierung der Iris [22]	54
2.6	Konstanten des Kokoschka-Modells [55]	60
2.7	Übersicht der physiologischen Faktoren der Formempfindung nach Hentschel [48]	62
3.1	Verwendete Randbedingungen zur Bestimmung des Visibility Levels	81
4.1	Parametervariationen bei den PWS-Versuchen	93
4.2	Bewertungsstufen zur Farbunterschiedswahrnehmung	96
4.3	Zusammenstellung der Rahmenbedingungen zu den PWS-Versuchen	97
4.4	Diskretisierung des Medians der Probandenbewertungen	98
4.5	Parameter der approximierten Ellipsen der Teilversuche 1 - 14	100
4.6	Vergleich zwischen unterschiedlichen Untersuchungsergebnissen zur Farbunter- schiedswahrnehmung [74],[9],[66]	104
4.7	Aufschlüsselung der Daten der Validierungsversuche	107
4.8	Zusammenstellung der Rahmenbedingungen zu den Validierungsversuchen zur Farbunterschiedswahrnehmung	112
4.9	Fehlerquote der modellierten Farbunterschiedsbewertung	117
4.10	Fehlerquote der modellierten Farbunterschiedsbewertung unter der Verwendung der LED-Farborte	118
4.11	Bewertung von LED-Binnings verschiedener Hersteller für die Verwendung in Lichtleistersysteme	120
5.1	Konstanten des WES-Helligkeitsmodells	128
5.2	Auflistung und Beschreibung der Inhomogenitätsmuster der WES Versuche . .	129
5.3	Bewertungsstufen zur Homogenitätswahrnehmung	131
5.4	Zusammenstellung der Rahmenbedingungen der WES-Versuche	131
5.5	Zusammenstellung der Rahmenbedingungen zu den Validierungsuntersuchun- gen mit realen Heckleuchten unter nachtähnlichen Bedingungen	148
5.6	Zusammenstellung der Rahmenbedingungen zu den Validierungsuntersuchun- gen mit realen Heck- und Frontleuchten unter tageslichtähnlichen Bedingungen	160

B.1	Minimale Beobachtungsabstände bei verschiedenen Fahrzeugtypen	190
B.2	Maximale horizontale Beobachtungswinkel bei verschiedenen Fahrzeugtypen unter Berücksichtigung der maximalen und minimalen Beobachtungsentfernungen für $d_{Fzg-Fzg}$	191
B.3	Maximale vertikale Beobachtungswinkel bei verschiedenen Fahrzeugtypen unter Berücksichtigung der maximalen und minimalen Beobachtungsentfernungen für $d_{Fzg-Fzg}$	192
C.1	Abweichung zwischen berechnetem Wert und Messwert beim inneren Ring . . .	201
C.2	Abweichung zwischen berechnetem Wert und Messwert beim äußeren Ring . .	201
C.3	Farborte zur Bestimmung der Ellipsenparameter in der CIE xy-Farbtabel	209
C.4	Farborte zur Bestimmung der Ellipsenparameter in der CIE u'v'-Farbtabel . . .	210
D.1	Farborte in der CIE xy-Farbtabel für die Grenzmuster des BMW 3er Scheinwerfers	220
D.2	Farborte in der CIE xy-Farbtabel für die Grenzmuster des BMW 5er Scheinwerfers - Teil 1	221
D.3	Farborte in der CIE xy-Farbtabel für die Grenzmuster des BMW 5er Scheinwerfers - Teil 2	222
D.4	Farborte in der CIE xy-Farbtabel für die Grenzmuster des BMW 7er Scheinwerfers	223
E.1	Signifikanz- und Effektstärkenanalyse: Parametervariation - Strukturüberlagerung	230
E.2	Bestimmtheitsmaß: Separate Untersuchung der lokalen Inhomogenität über alle Gütekriterien - „lokale“ Auswertung	235
E.3	Bestimmtheitsmaß: Separate Untersuchung der lokalen Inhomogenität über alle Gütekriterien - „globale“ Auswertung	235
E.4	Bestimmtheitsmaß: Separate Untersuchung der lokalen Inhomogenität über alle Gütekriterien - „lokal oder globale“ Auswertung	236
F.1	Signifikanz- und Effektstärkenanalyse: Parametervariation - Umgebungshelligkeit $L_u \approx 0,01 \text{ cd/m}^2$ / $L_u \approx 3 \text{ cd/m}^2$	238
F.2	Signifikanz- und Effektstärkenanalyse: Parametervariation - Beobachtungsrichtung HV / H30	239
G.1	Testzeichengrößenfaktoren $\Phi^{0,5}$ und $L^{0,5}$	246
G.2	Kontrastpolaritätsfaktoren $\Phi^{0,5}$ und $L^{0,5}$	247
G.3	Altersfaktor F_A	248

Anhang A – Datenblätter Messtechnik

A.1 Auszug Datenblatt LMK-Color 98-3



OPTE·E·MA
ENGINEERING GmbH



TechnoTeam
Bildverarbeitung GmbH

Leuchtdichte- und Farbmesskamera LMK 98-3 Color



Sensor	CCD Sony ICX 285 AL
Auflösung (effektive Bildpunkte)	1380 (H) x 1030 (V)
Pixelraster	6.45 µm x 6.45 µm
Sensorfläche	8.9 (H) x 6.64 (V) mm² (2/3")
Ausleseregime	Progressive Scan
Videosignal	12 bit digital
Computerschnittstelle	FireWire Interface (IEEE1394, iLink)
Auflösung Einzelpunkt (Dynamikumfang)	Einzelmessung: 1:1100 (≈ 61 dB) Mehrfachmessung (10 Bilder): 1:3600 (≈ 71 dB) HighDyn-Messung: 1:10 000 000 (≈ 140 dB)
Spektrale Anpassung ¹	Direkte Realisierung der Normspektralwertkurven nach CIE31 durch vier Vollfilter (Zwei Filter für X und je ein Filter für Y/V(λ) und Z)
Güte der spektralen Anpassung	$V(\lambda) f_1 < 3 \% ^2$ $X(\lambda) f_1 < 4 \% \quad Z(\lambda) f_1 < 6 \% \quad V(\lambda) f_1 < 6 \% ^2$
Zusätzliche Filterpositionen	Glasfilter (standard ⁴)
Messgrößen / measurement parameters	Skotopische Anpassung V' (λ) (optional) Leuchtdichte L (cd/m²) - Farbkoordinaten: x,y Weitere unterstützte Farbräume: RGB, XYZ, sRGB, EBU-RGB, User, Lxy, Luv, Lu'v', L*u*v*, C*h*s*uv, L*a*b*, C*h*ab; HIS; HSV; HSL Dominante Wellenlänge, Sättigung, ähnlichste Farbtemperatur optional: skotopische Leuchtdichte L' (cd/m²)

¹ Siehe Darstellung der spektralen Empfindlichkeiten.

² Kennwert nach DIN5032 mit Wichtung durch Normlichtart A.

³ Kennwert nach DIN5032 ohne Wichtung durch Normlichtart A.

⁴ Die Position des Glasfilters kann für Messungen im nahen infraroten Bereich und für den Betrieb eines Spektrometervorsatzes eingesetzt werden.

OPTE-E-MA Engineering GmbH - www.opteema.de - Tel.: +49 (3677) 668 260 Fax.: +49 (3677) 668 261





Spezifikation Leuchtdichte- und Farbmesskamera LMK 98-3 Color

Messfeldwinkel ⁵	variabel wählbar																				
Objektive	Alle Objektive mit fester Brennweite																				
Feste Entfernung	telezentrisches Makroobjektiv Objektive mit den Brennweiten: 8mm, 25mm, 50mm, 100mm																				
Fokussierbar	Brennweiten: 25mm, 50mm																				
Messbereichswahl	Über die Veränderung der Integrationszeit: 100µs..15s																				
Smearkorrektur	Korrektur des Einflusses von Smear für Integrationszeiten < 1 ms																				
Moduliertes Licht	Bei bekannter Modulationsfrequenz des Lichtes werden die Integrationszeiten automatisch zu Vielfachen der Periodendauer gewählt.																				
Messbereiche (Messbereichsendwerte)	abhängig vom Objektiv z.B.: 0.1 ... 10 000 cd/m² >300 000 000 cd/m² über Graufilter																				
Messzeit	Abhängig von der gewählten maximalen Integrationszeit und den Objektivdaten.																				
Leuchtdichtemessung	<table><tr><th colspan="4">Einzelmessung (SP) / Mehrfachmessung (10Bilder)(MP)</th></tr><tr><th>Integrationszeit (s)</th><th>minimale Leuchtdichte (cd/m²)</th><th colspan="2">Messzeit (s)</th></tr><tr><td></td><td></td><th>SP</th><th>MP</th></tr><tr><td>0.1</td><td>10</td><td>1</td><td>7</td></tr><tr><td>1</td><td>1</td><td>2</td><td>20</td></tr></table>	Einzelmessung (SP) / Mehrfachmessung (10Bilder)(MP)				Integrationszeit (s)	minimale Leuchtdichte (cd/m²)	Messzeit (s)				SP	MP	0.1	10	1	7	1	1	2	20
Einzelmessung (SP) / Mehrfachmessung (10Bilder)(MP)																					
Integrationszeit (s)	minimale Leuchtdichte (cd/m²)	Messzeit (s)																			
		SP	MP																		
0.1	10	1	7																		
1	1	2	20																		
Farbmessung	<table><tr><th colspan="3">HighDyn-Messung</th></tr><tr><th>Integrationszeit (s)</th><th>minimale Leuchtdichte (cd/m²)</th><th>Messzeit (s)</th></tr><tr><td>0.1</td><td>10</td><td>20</td></tr><tr><td>1</td><td>1</td><td>30</td></tr></table>	HighDyn-Messung			Integrationszeit (s)	minimale Leuchtdichte (cd/m²)	Messzeit (s)	0.1	10	20	1	1	30								
HighDyn-Messung																					
Integrationszeit (s)	minimale Leuchtdichte (cd/m²)	Messzeit (s)																			
0.1	10	20																			
1	1	30																			
räumliche Bewertung ⁶	f ₂ (g)< 0.5 %																				
Einfluss der Umfeldleuchtdichte	f ₂ (u)< 2 % ⁷																				
Linearitätsfehler	f ₃ < 0.2 %																				
Abgleichfehler	f ₁₁ < 0.5 %																				
Kalibrierunsicherheit ⁸	Objektive mit fester Fokuseinstellung: < 2 % fokussierbare Objektive: < 2.5 %																				
Wiederholpräzision ⁹	x,y < 0.0001 L < 0.1 %																				
Messfehler	3 % (L Normlichtart A) x,y < 0.0020 (Normlichtart A) x,y < 0.0100 (Testfarbsatz) ¹⁰ dominante Wellenlänge siehe Grafik																				
Gleichförmigkeit	< 2 %																				

⁵ Siehe separate Tabelle mit Objektivdaten.

⁶ Alle Messungen der f_x -Kennwerte nach DIN 5032-6.

⁷ Bei einem Flächenverhältnis von 10:1 von leuchtender zu nicht leuchtender Fläche.

⁸ Kalibrierung nach DIN 5032-6 an einem von der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt

zurückgeführten Leuchtdichtenormal.

⁹ Messung einer stabilisierten weißen LED Lichtquelle mit ($L=100\text{ cd/m}^2$; $x=0.3553$; $y=0.3521$). Mittelwert über 1000 Pixel. Wiederholpräzision als Streuung des Mittelwertes. Die Wiederholpräzision beschreibt die Abweichungen bei wiederholten Messungen unter identischen Messbedingungen mit den gleichen Parametern für Aufnahme und Auswertung der Daten.

¹⁰ Gemessen an 30 Proben verschiedenster spektraler Verteilung auf der Basis von ROSCO Filterfolien.



A.2 Auszug Datenblatt Specbos 1201



Spectroradiometer specbos 1201

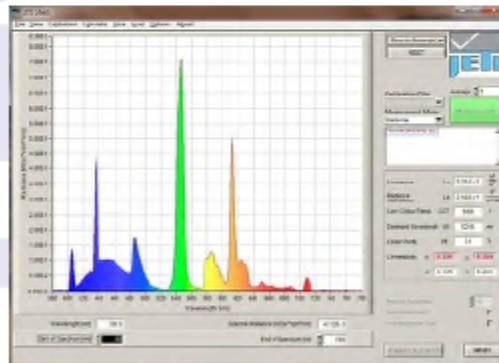
specbos 1201 is a precise and compact VIS-spectroradiometer.

It can be used in laboratory as well as in production environment to measure the following quantities:

- Luminance, Radiance
- Illuminance, Irradiance
- Xy and u'v' coordinates
- Dominant wavelength, spectral bandwidth (FWHM)
- Correlated Color Temperature
- Color Rendering Index



Luminous Intensity and Luminous Flux measuring heads are available optionally.



Screen shot of the radiometric software

The instrument can be operated with the intuitive measuring software (for a demo version see www.opteema.com).

Furthermore, it is possible to implement the instrument into individual applications using the virtual COM port directly by the following ways:

- Radiometric DLL
- Radiometric Virtual Instruments for LabView
- Serial commands

Advantages:

- USB powered
- Internal target spot laser (luminance measurements)
- Easy to install
- Start of measurement with external trigger signal

Applications:

- LED-Applications
- TV, Monitors, LCD-, LED-Displays
- Digital projectors
- Traffic lights, automotive lights
- Illumination
- Lamps and luminaries

Specification

Optical parameters	
Spectral range	380 nm ... 780 nm
Wavelength resolution	5 nm
Calculated wavelength step	1 nm
Digital electronic resolution	15 bit ADC
Viewing angle	1,8°
Measuring distance/ diameter	20 cm - Ø 6 mm; 100 cm - Ø 31 mm (luminance)
Measuring values	
	Spectral radiance
	Total luminance / total radiance
	Total illuminance / total irradiance
	Chromaticity coordinates x,y; u',v'
	Correlated Color Temperature
	Dominant wavelength, color purity
	Peak wavelength, FWHM
	Color Rendering Index
Measuring ranges and accuracies	
Measuring range luminance	2 ... 7 x 10 ⁶ cd/m ² (higher values with optional filter)
Measuring range illuminance	20 ... 5 x 10 ⁵ lx
Luminance accuracy	± 2 % (@ 1000cd/ m ² and 2856 K)
Luminance reproducibility	± 1 %
Chromaticity accuracy	± 0.002 x, y (@ 2856 K)
Color reproducibility	± 0.0005 x, y
CCT reproducibility	± 20 K (@ 2856 K)
Wavelength accuracy	± 0.7 nm
Other technical data	
Dispersive element	Imaging grating (flat field)
Light receiving element	Photodiode array 1024 pixel
Power supply	USB powered
Interface	USB 2.0 fullspeed
Dimensions	140 mm x 58 mm x 34 mm
Weight	350 g
Operating conditions	Temperature 10 ... 40 °C
	Humidity < 85 % relative humidity at 35 °C
Accessories (included)	PC software JETI radiometric for Windows 2000/XP
	DLL, LabVIEW VIs
	USB cable and trigger connector
	Tripod
	Diffusor (for illumination measurement)
	Calibration certificate
	Operation instructions
Calibration	NIST traceable
Recommended recalibration interval	1 year

OPTE-E-MA Engineering GmbH
 Am Veronikaberg 2
 D-98693 Martinroda - Germany

Tel. +49(3677)79 0558
 Fax. +49(3677)79 0559
 e-mail: info@opteema.com
 Internet: www.opteema.com

101201-0005en

Anhang B – Herleitung von Bewertungsszenarien im Alltag

Eine Aktivierung der Lichtikonen eines Fahrzeugs erfolgt bei der Verwendung der Hauptlichtfunktionen Stand-, Fahr-, und Tagfahrlicht. Die Standlichtfunktion kann vom Fahrer¹ unabhängig von der Umgebungshelligkeit eingeschaltet werden. Die Funktion beinhaltet die Aktivierung der vorderen und hinteren Begrenzungsleuchten sowie der Kennzeichenleuchten und dient zur Erkennbarkeit des Fahrzeugs. Damit nachts die Erkennbarkeit und die Auffindbarkeit für eine sich an ein Fahrzeug annähernde Person gegeben ist, wird beim Ent- und Verriegeln über die Funkfernbedienung das Begrüßungslicht aktiviert. Durch die Ansteuerung mit einer Pulsweitenmodulation oder einer Peakstromänderung kann bei Fahrzeugprojekten eine Doppelfunktion wie kombiniertes Positions- und Tagfahrlicht mit einem Leuchtmittel realisiert werden. Das Tagfahrlicht ist derzeit von Fahrzeugherstellern unterschiedlich umgesetzt. Es gibt hierbei zwei Varianten, eine Aktivierung des Tagfahrlichts mit und ohne Schlusslicht. Obwohl die Gewährleistungskosten sowie die Energiebilanz gegen eine Aktivierung des Schlusslichts sprechen, wurde in der Vergangenheit aus Gründen der Erkennbarkeit eines Fahrzeuges das Schlusslicht in Verbindung mit dem Tagfahrlicht aktiviert. Da die Gesetzgebung durch die ECE-Regelung R48 Revision 5 die Aktivierung des Schlusslichts am Tage zukünftig untersagt, wird bereits bei heutigen Neuwagen eine Realisierung ohne ein Schlusslicht von den Fahrzeugherstellern verfolgt [35]. Bei der Funktionalität Fahrlicht werden die Leuchten für das vordere und hintere Begrenzungslicht sowie das Abblendlicht und die Kennzeichenleuchte aktiviert.

Da bereits heute viele Fahrzeuge einen Lichtsensor besitzen und ein Lichtsensor ab 2015 durch die ECE-Regelung R48 Revision 5 für alle neuzugelassenen Fahrzeuge gesetzlich vorgeschrieben wird, sind die genannten Lichtfunktionen nicht bei allen Umgebungshelligkeiten aktivierbar. Das Tagfahrlicht ist am Tag immer eingeschaltet. Das Abblendlicht kann sowohl tags und nachts vom Fahrer aktiviert werden, wobei die Aktivierung am Tage unter ungünstigen Voraussetzungen wie schlechte Sichtbedingungen (z.B. bei Regen, Nebel oder in der Dämmerung) erfolgt [35].

Die Kontrastwahrnehmung und die Sichtbarkeit eines Objekts wird durch die sehinkelabhängige Größe des betrachteten Objekts bzw. Details (vgl. Kapitel 2.4) beeinflusst. Der Sehinkel ist vom Abstand zwischen Beobachter und Detail abhängig. Das führt dazu, dass in geringen

¹Aus Gründen der besseren Lesbarkeit wird in der gesamten vorliegenden bei geschlechtsspezifischen Begriffen nur die maskuline Form verwendet. Dies schließt jedoch die weibliche und männliche Form mit ein.

Betrachtungsentfernungen die Homogenität am kritischsten bewertet werden kann. In Verkaufsräumen kann der Abstand zwischen 10 Metern und wenigen Zentimetern betragen, wenn ein potenzieller Kunde die Lichtkomponenten genauer einsehen möchte. Durch die Reichweite der Funkfernbedienung eines Fahrzeugs können Beobachtungsentfernungen von 0,25 bis zu 10 Metern definiert werden.

Die größte Aufmerksamkeit erregen lichttechnische Fahrzeugkomponenten jedoch im alltäglichen Straßenverkehr. Unter der Voraussetzung einer nach FMVSS 108 kreisförmig definierten Schlusslichtfläche von $12,5 \text{ cm}^2$, einer Sehschärfe von 1 sowie einer ebenen und geraden Fahrbahn kann theoretisch eine maximale Beobachtungsentfernung von 137 m ermittelt werden [76]. Da jedoch für die Bewertung der Homogenität eine hohe Aufmerksamkeit erforderlich ist, wird angenommen, dass die Bewertung in stationären Verkehrssituationen bei einer Aneinanderreihung von Fahrzeugen erfolgt. Als Beispiele hierfür sind unter anderem das Warten an einer roten Ampel sowie in einer Stausituation zu nennen. In diesen Verkehrssituationen kann die Beobachtungsdistanz $d_{FZG-FZG}$ aus der Summe der Entfernungen zwischen dem Fahrer und dem vorderen Ende der Motorhaube $d_{\text{Fahrer-Haube}}$ mit einer Toleranz $d_{\text{Fahrer-Haube-Toleranz}}$ sowie einem Sicherheitsabstand zum voranstehenden Fahrzeug $d_{\text{Sicherheit}}$ mit einer Toleranz $d_{\text{Sicherheit-Toleranz}}$ bestimmt werden (siehe Abbildung B.1). Die Toleranz beim Abstand zwischen Motorhaube und Fahrer liegt in den unterschiedlichen Sitzpositionen und dessen Körpergröße begründet.

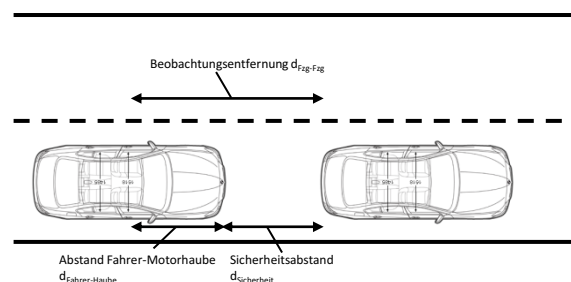


Abbildung B.1: Darstellung der kritischen Entfernungen für die Homogenitätsbewertung

In Tabelle B.1 werden die Beobachtungsentfernungen inklusive Toleranzen repräsentativ für verschiedene Fahrzeugklassen wie zum Beispiel für Klein-, Sport- und Geländewagen sowie für Limousinen detailliert aufgelistet. Dazu wurden von verschiedenen BMW-Fahrzeugen mit Hilfe von Konstruktionsmodellen im CAD die Entfernungen zwischen der vorderen Stoßfängerkannte und dem Augpunkt des Fahrers ermittelt. Innerhalb des Fahrzeugmodells wird das so genannte RAMSIS Modell² zur Verfügung gestellt, mit dem ein Durchschnittsmensch, und ein überdurchschnittlich kleiner oder großer Mensch im Fahrzeug positioniert werden kann [102]. Aus dieser Analyse heraus ergibt sich eine Toleranz $d_{\text{Fahrer-Haube-Toleranz}}$ von $\pm 0,3$ m. Im Rahmen dieser Arbeit wird angenommen, dass eines der beiden Fahrzeuge vor dem

²Rechnergestütztes Anthropometrisch-Mathematisches System zur Insassen-Simulation

anderen mit einer Geschwindigkeit zwischen 1 - 3 km/h anrollen kann. Dies kann zum Beispiel bei einem Ampelphasenwechsel an einer geneigten Fahrbahn der Fall sein. Daher sollte der Sicherheitsabstand $d_{\text{Sicherheit}}$ zwischen den beiden Fahrzeugen unter der Berücksichtigung einer Reaktions- und Bremszeit von 2 Sekunden sowie den zuvor genannten Geschwindigkeiten bei einem Zahlenwert zwischen 0,55 m bis 1,65 m liegen. Der ermittelte Gesamtabstand inklusive aller Toleranzen variiert bei den geprüften Fahrzeugen zwischen 2,23 m und 4,44 m.

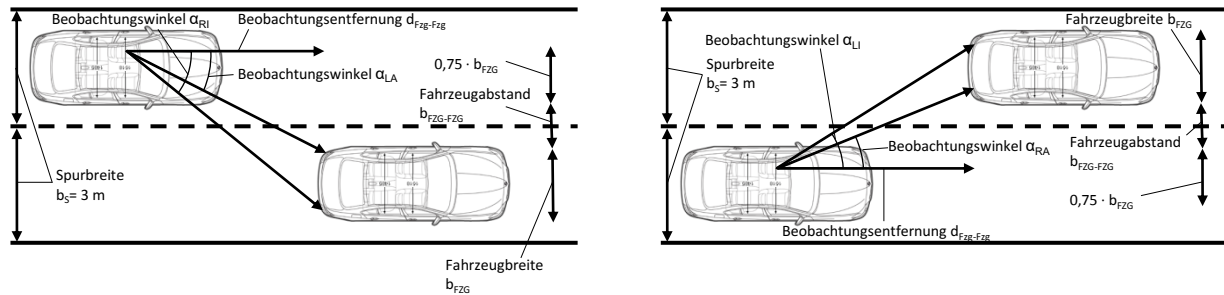
Tabelle B.1: Minimale Beobachtungsabstände bei verschiedenen Fahrzeugtypen

Modell- bezeichnung	Abstand Fahrer-Motorhaube $d_{\text{Fahrer-Haube}}$ in m	Sicherheitsabstand $d_{\text{Sicherheit}}$ in m	Gesamtabstand $d_{\text{Fzg-Fzg}}$ in m
Mini Couper	$1,98 \pm 0,3$	$1,10 \pm 0,55$	$3,08 \pm 0,85$
BMW i3	$2,14 \pm 0,3$	$1,10 \pm 0,55$	$3,24 \pm 0,85$
BMW i8	$2,37 \pm 0,3$	$1,10 \pm 0,55$	$3,47 \pm 0,85$
BMW 2er	$2,27 \pm 0,3$	$1,10 \pm 0,55$	$3,37 \pm 0,85$
BMW 4er	$2,26 \pm 0,3$	$1,10 \pm 0,55$	$3,36 \pm 0,85$
BMW 6er	$2,49 \pm 0,3$	$1,10 \pm 0,55$	$3,59 \pm 0,85$
BMW 7er	$2,34 \pm 0,3$	$1,10 \pm 0,55$	$3,44 \pm 0,85$
BMW X5	$2,34 \pm 0,3$	$1,10 \pm 0,55$	$3,44 \pm 0,85$

Für die Bestimmung eines typischen Betrachtungswinkels kann wieder die Annahme getroffen werden, dass stationäre Verkehrssituationen den typischen Fall für die Homogenitätsbewertung darstellen. Anders als bei der Betrachtung eines Fahrzeugs im Verkaufsraum oder bei der Aktivierung der Lichtfunktionen über den Funkschlüssel sind hierbei Betrachtungswinkel $\pm 90^\circ$ unüblich. Unter der Annahme einer zweispurigen Fahrbahn mit zwei 3 Meter breiten Fahrspuren, den in Tabelle B.2 aufgelisteten Fahrzeugbreiten sowie der typischen Betrachtungsentfernung $d_{\text{Fzg-Fzg}}$ zwischen 2,23 m und 4,44 m kann mit Gleichung B.1 der horizontale Betrachtungswinkel einer Heckleuchtenkombination auf einer benachbarten Fahrspur berechnet werden [8].

$$\alpha = \arctan \left(\frac{0,75 \cdot b_{\text{FZG}} + b_{\text{FZG-FZG}}}{d_{\text{FZG-FZG}}} \right) \quad (\text{B.1})$$

Zusätzlich wird die Annahme getroffen, dass die Fahrzeuge A und B identisch sind und sich mittig in der Fahrspur befinden (siehe Abbildung B.2).



(a) horizontaler Beobachtungswinkel für einen Beobachter in der linken Fahrspur

(b) horizontaler Beobachtungswinkel für einen Beobachter in der rechten Fahrspur

Abbildung B.2: Darstellung der kritischen Winkel für die Homogenitätsbewertung

Tabelle B.2: Maximale horizontale Beobachtungswinkel bei verschiedenen Fahrzeugtypen unter Berücksichtigung der maximalen und minimalen Beobachtungsentfernungen für $d_{Fzg-Fzg}$

Modell- bezeichnung	Fahrzeug- breite b_{Fzg} in m	Linke Heckleuchte	Linke Heckleuchte	Rechte Heckleuchte	Rechte Heckleuchte
		Fahrzeug- außenseitig α_{LA} in °	Fahrzeug- innenseitig α_{LI} in °	Fahrzeug- außenseitig α_{RA} in °	Fahrzeug- innenseitig α_{RI} in °
Mini Couper	1,69	30,2 bis 49,1	37,6 bis 56,9	21,4 bis 37,8	43,9 bis 62,4
BMW i3	1,61	30,4 bis 49,3	37,5 bis 56,7	22,0 bis 38,8	43,5 bis 62,0
BMW i8	1,87	29,7 bis 48,6	38,0 bis 57,2	19,8 bis 35,6	44,8 bis 63,1
BMW 2er	1,76	30,0 bis 48,9	37,8 bis 57,0	20,8 bis 37,0	44,2 bis 62,7
BMW 4er	1,54	30,5 bis 49,5	37,4 bis 56,6	22,6 bis 39,5	43,1 bis 61,8
BMW 6er	1,89	30,5 bis 48,5	38,1 bis 57,3	19,6 bis 35,3	44,9 bis 63,2
BMW 7er	1,91	29,6 bis 48,5	38,1 bis 57,3	19,4 bis 35,0	45,0 bis 63,3
BMW X5	1,87	29,7 bis 48,6	38,0 bis 57,2	19,8 bis 35,6	44,8 bis 63,1

Aus der Berechnung der jeweiligen Fahrzeugmodelle ergibt sich nach Tabelle B.2 für die linke Heckleuchte in Abhängigkeit der zuvor genannten Distanzen $d_{Fzg-Fzg}$ von 2,23 m bis 4,44 m ein maximaler Bereich für den horizontalen außenseitigen Winkel α_{LA} von 29,6° bis 49,5°. Für den innenseitigen Winkel α_{LI} kann ein Bereich 37,4° bis 57,3° bestimmt werden. Bei der rechten Heckleuchte kann für den außenseitigen Winkel α_{RA} ein um 10° verschobener Bereich von 19,4° bis 39,5° und für den innenseitigen Winkel α_{RI} ein Bereich von 43,1° bis 63,3° ermittelt werden. Es zeigt sich, dass sowohl bei der linken als auch bei der rechten Heckleuchte auf Grund der Größe des horizontalen Winkels eine fahrzeuginnenseitige im Gegensatz zu einer fahrzeugaußenseitigen Beobachtung kritischer hinsichtlich der Homogenitätsbewertung ist. Dennoch wird eine fahrzeuginnenseitige Beobachtung unter den Prämissen der ermittelten Winkel im Rahmen der Homogenitätsuntersuchungen nicht untersucht, da die ermittelten innenseitigen Beobachtungswinkel größtenteils größer als die gesetzlich vorgeschriebenen

geometrischen Sichtbarkeitswinkel (fahrzeuginnenseitig bis 45° , fahrzeugaußenseitig bis 80°) sind.

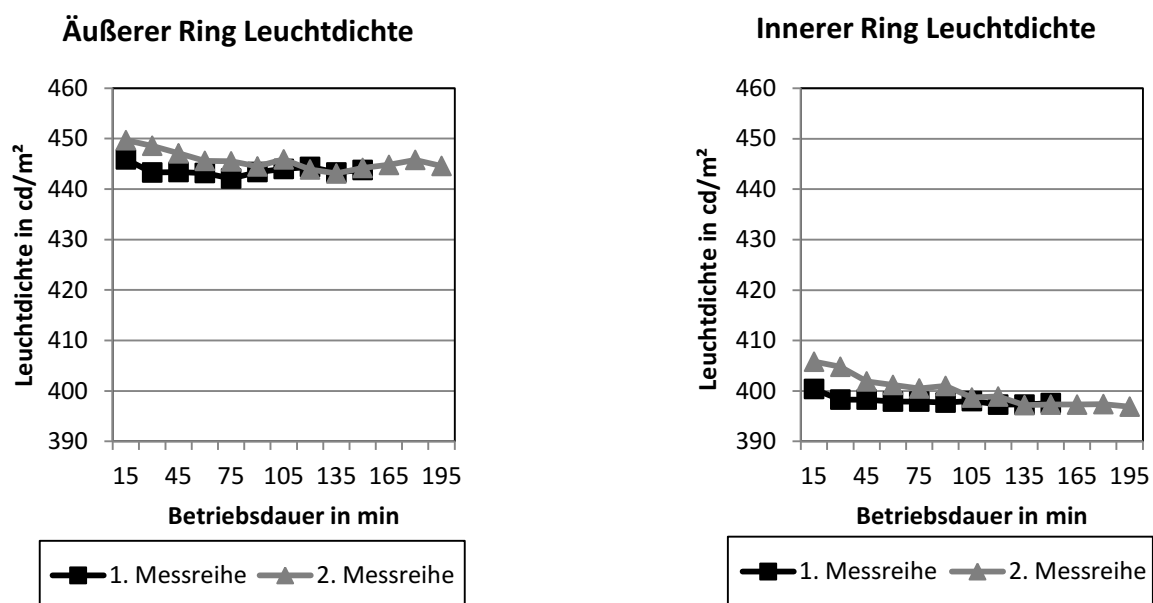
Die Anbauhöhe der Schluss- und Positionslichtfunktion darf nach den ECE-Regelungen maximal zwischen 0,35 bis 1,5 m variieren [36]. In Abhängigkeit einer Betrachtungsentfernung von $d_{Fzg-Fzg}$ von 2,23 m bis 4,44 m und der in Tabelle B.3 aufgelisteten Augpunkthöhen, ergibt sich im alltäglichen Straßenverkehr ausgehend von der Heckleuchte ein vertikaler Winkelbereich zur Fahrbahn zugewandt von $5,6^\circ$ bis $11,1^\circ$ und zur Fahrbahn abgewandt ein vertikaler Bereich von $12,6^\circ$ bis $24,0^\circ$. Dieser Winkel kann aufgrund der geringen Abweichung zum Erscheinungsbild in senkrechter Beobachtungslage aus praktischen Gründen vernachlässigt werden. In Verkaufsräumen und beim Entriegeln des Fahrzeugs werden die Leuchten jedoch unter einem weitaus höheren vertikalen Winkel betrachtet. Realistische Betrachtungswinkel liegen hier bei bis zu 60° . Eine Auslegung der Lichtfunktionen in einem vertikalen Winkelbereich von bis -20° bis 60° ist aufgrund des benötigten Lichtstroms nicht wirtschaftlich umsetzbar.

Tabelle B.3: Maximale vertikale Beobachtungswinkel bei verschiedenen Fahrzeugtypen unter Berücksichtigung der maximalen und minimalen Beobachtungsentfernungen für $d_{Fzg-Fzg}$

Modell- bezeichnung	Augpunkt	Fahrbahn abgewandt β_o in $^\circ$	Fahrbahn zugewandt β_u in $^\circ$
Mini Couper	1,12	9,8 bis 19	4,9 bis bis 9,7
BMW i3	1,35	12,6 bis 24	2,0 bis 4,0
BMW i8	1,06	9,1 bis 17,7	5,6 bis 11,1
BMW 2er	1,12	9,9 bis 19,1	4,9 bis 9,6
BMW 4er	1,09	9,5 bis 18,4	5,2 bis 10,3
BMW 6er	1,09	9,5 bis 18,4	5,2 bis 10,3
BMW 7er	1,14	10,2 bis 19,6	4,6 bis 9,0
BMW X5	1,24	11,3 bis 21,7	3,4 bis 6,6

Anhang C – Anhang zu den Untersuchungen am Positionslicht- Warmerscheinungssimulator

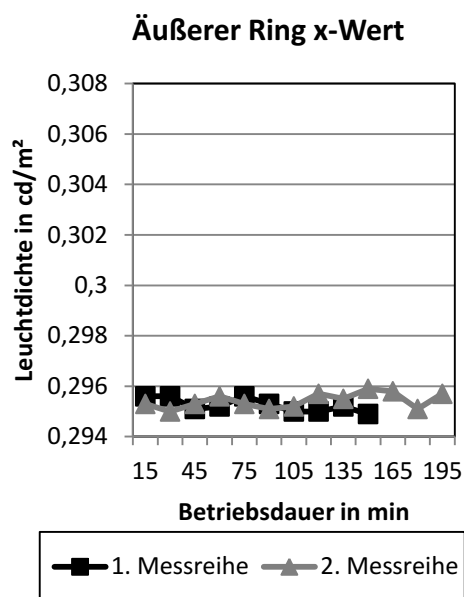
C.1 Photometrische Stabilität des Positionslicht-Warmerscheinungssimulators



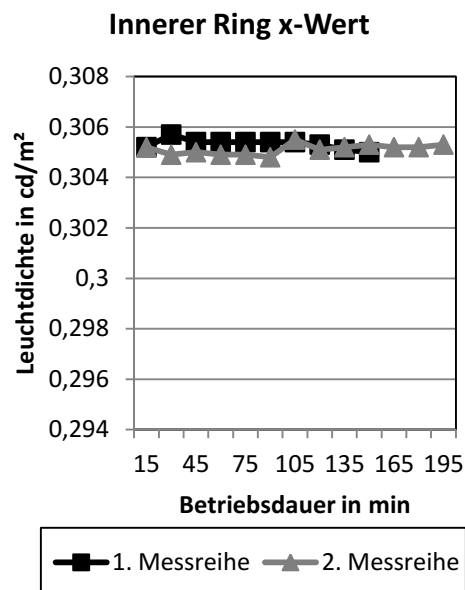
(a) Stabilität der Leuchtdichte des äußeren
Lichtleittrings

(b) Stabilität der Leuchtdichte des inneren
Lichtleittrings

Abbildung C.1: Leuchtdichtestabilität des PWSs

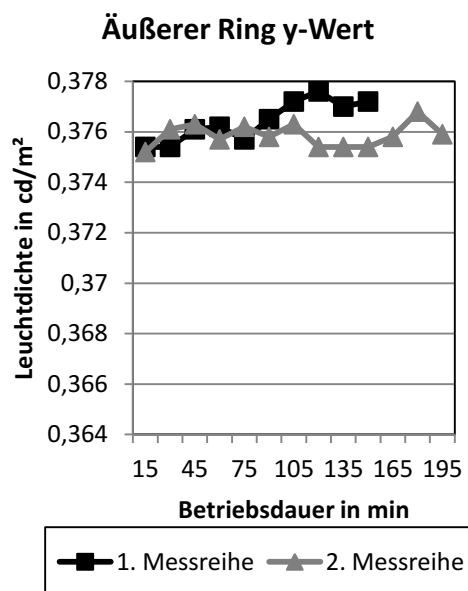


(a) Stabilität des x Farbwertanteils des äußeren Lichtleitrings

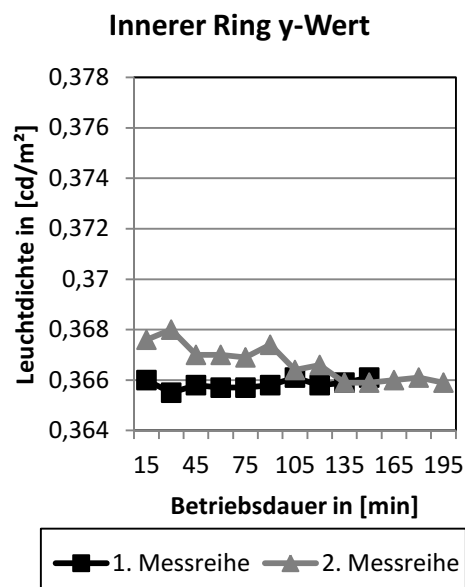


(b) Stabilität des x Farbwertanteils inneren Lichtleitrings

Abbildung C.2: Stabilität des x Farbwertanteils des PWSs



(a) Stabilität des y Farbwertanteils des äußeren Lichtleitrings



(b) Stabilität des y Farbwertanteils inneren Lichtleitrings

Abbildung C.3: Stabilität des y Farbwertanteils des PWSs

C.2 Farberzeugung eines D-ILA Projektors

Der Einsatz von Projektoren als Lichtquellen bietet in vielerlei Hinsicht Vorteile. Ein Projektor ermöglicht es, dass ein großer Helligkeitsbereich und eine große Vielfalt von Farben beliebig über einen Computer angesteuert werden können. Eine Dimmung der Helligkeit erfolgt nicht mit der Reduzierung des Lichtstroms der Lichtquelle, sondern mit Hilfe von verschiedenen technischen Verfahren, von denen ausschließlich das Verfahren des eingesetzten 3-Chip D-ILA Projektors näher erläutert wird.

Bei einem Dimmstufenwechsel erreicht das System einen stabilen Arbeitspunkt im Hinblick auf Helligkeit und Farbigkeit innerhalb eines Zeitraums kleiner 16 Millisekunden [46]. Zudem besitzen 3-Chip D-ILA Projektoren eine hohe Farbtreue und keine störenden Effekte beeinflussen das farbige Erscheinungsbild des Gesamtsystems negativ. Als ein solcher negativer Effekt ist der Regenbogen-Effekt zu nennen, bei dem ein Beobachter ein farbiges Bild zeitlich hintereinander in den Primärfarben Rot, Grün und Blau aufgrund eines Zeitmultiplexverfahrens wahrnehmen kann. Dieser ist z.B. bei einem 1-Chip Digital Light Processing bzw. Digital Micromirror Device Projektor (DLP) durch das rotierende Farbrad bedingt [17].

Bei dem verwendeten 3-Chip D-ILA Projektor dient eine Xenon-Gasentladungslampe als Lichtquelle (siehe Abbildung C.4). Mit Hilfe eines P- und S-Wellen Kombinierers (PSC - PS Combiner) wird das Licht der Gasentladungslampe zunächst in Form einer S-Welle (transversal) polarisiert. Anschließend wird für die Erzeugung von Farben das Licht mit dichroitischen Spiegeln spektral in die Primärfarben Rot, Grün und Blau aufgespalten und über polarisierende Strahlteiler (PBS - Polarizing beam splitter) auf jeden D-ILA Chip gelenkt.

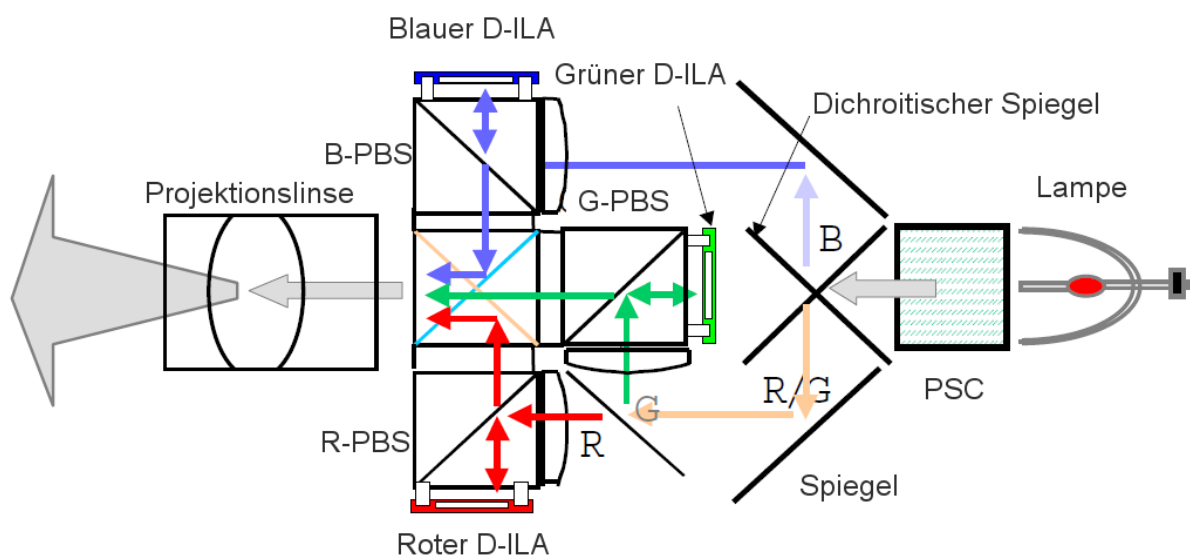


Abbildung C.4: Optisches System eines D-ILA Projektors [46]

Wie Abbildung C.5 zeigt, besteht ein D-ILA Chip aus mehreren Schichten, mit denen die Helligkeit des Lichts einer Primärfarbe gesteuert wird. Bevor das einfallende Licht durch die planare Reflexionsfläche zum polarisierenden Strahlteiler reflektiert wird, durchdringt es ein Glassubstrat, eine transparente Elektrode und eine Schicht mit homeotropisch angeordneten Flüssigkristallen. Wird die Polarisation des vom D-ILA Chip reflektierten Licht nicht verändert, kann dieses Licht nicht durch den polarisierenden Strahlenteiler gelangen, sondern wird von diesem zur Lichtquelle reflektiert. Mit Hilfe einer Drehung der Flüssigkristalle kann die Polarisation des Lichts in Form einer P-Welle (longitudinal) so verändert werden, dass es teilweise oder vollständig den Strahlenteiler passieren kann. Die Ansteuerung der Flüssigkristalle erfolgt pixelweise über reflektierenden Pixel-Elektroden, welche rückseitig mit CMOS-Substrat verknüpft sind.

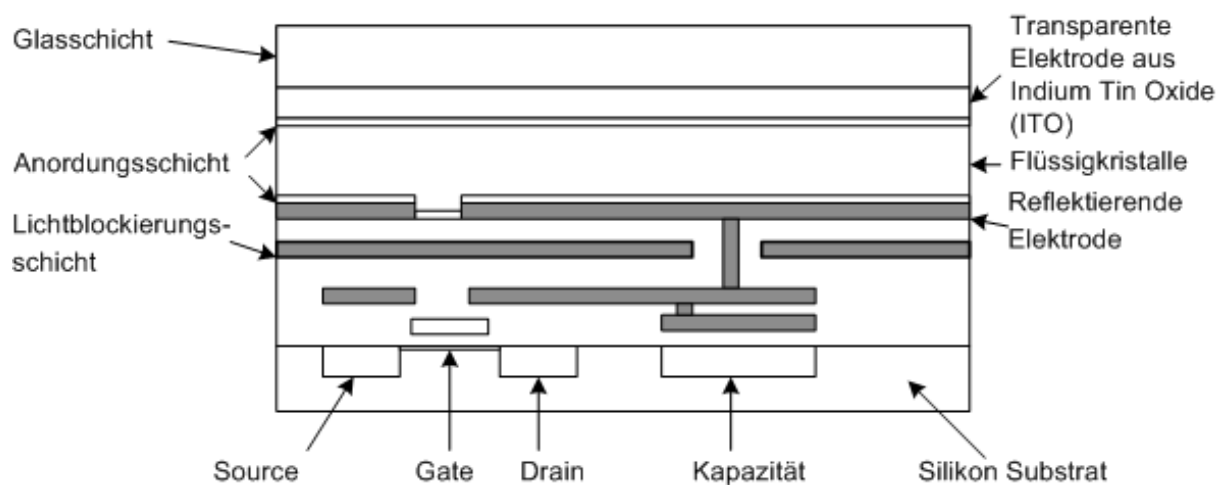


Abbildung C.5: Querschnitt eines D-ILA Chips [46]

Über weitere teildurchlässige Spiegel wird das Licht der Primärfarben Rot, Grün und Blau additiv überlagert, dessen Helligkeit durch die D-ILA Chips gesteuert wird.

C.3 Farbmischalgorithmus des Positionslicht-Warmerscheinungsbildsimulators

Der Farbgarment beider Projektoren ist so groß, dass eine Simulation der LED-Farbinnings inklusive der durch die Lichtleiterringe bedingten Farbveränderung innerhalb und außerhalb des ECE-Weiß-Bereichs möglich ist. Demzufolge ist es möglich, die Farbe jeder RGB-Kombination durch die Primärvalenzen des Normvalenzsystems zu beschreiben [52].

$$\vec{F}_R = X_R \cdot \vec{X} + Y_R \cdot \vec{Y} + Z_R \cdot \vec{Z} \quad (\text{C.1})$$

$$\vec{F}_G = X_G \cdot \vec{X} + Y_G \cdot \vec{Y} + Z_G \cdot \vec{Z} \quad (\text{C.2})$$

$$\vec{F}_B = X_B \cdot \vec{X} + Y_B \cdot \vec{Y} + Z_B \cdot \vec{Z} \quad (\text{C.3})$$

Nach den drei Grassmannschen Gesetzen ergibt sich die resultierende Farbvalenz \vec{F}_{Ges} aus der additiven Farbmischung (siehe Abbildung C.6) [7].

$$\vec{F}_{Ges} = \vec{F}_R + \vec{F}_G + \vec{F}_B \quad (\text{C.4})$$

Mit Hilfe von Umformungen der Gleichungen C.1 bis C.4 lässt sich die Farbvalenz durch das Normvalenzsystem beschreiben.

$$\vec{F}_{Ges} = X_{Ges} \cdot \vec{X} + Y_{Ges} \cdot \vec{Y} + Z_{Ges} \cdot \vec{Z} \quad (\text{C.5})$$

mit

$$\vec{X}_{Ges} = X_R + X_G + X_B \quad (\text{C.6})$$

$$\vec{Y}_{Ges} = Y_R + Y_G + Y_B \quad (\text{C.7})$$

$$\vec{Z}_{Ges} = Z_R + Z_G + Z_B \quad (\text{C.8})$$

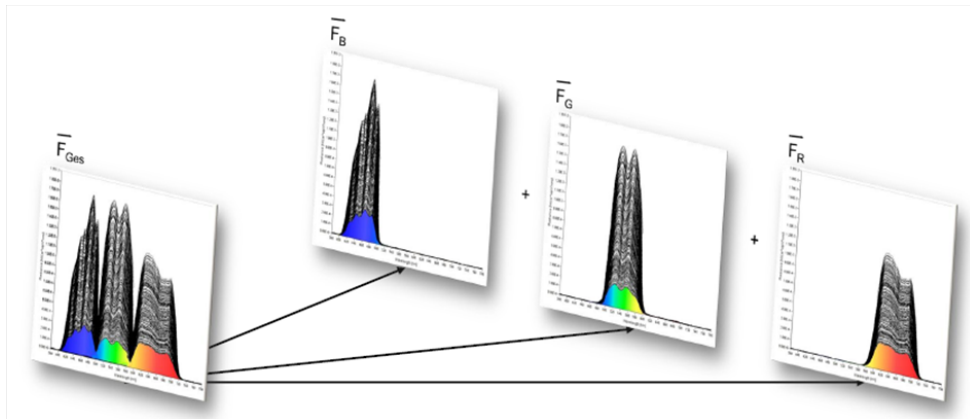


Abbildung C.6: Prinzip der additiven Farbmischung

Die Primärvalenzen X, Y und Z können durch die Farbwertanteile x, y und z beschrieben werden. Die Farbwertanteile sind normierte Größen, bei denen man auf eine Angabe der

Helligkeit verzichtet.

$$(X + Y + Z) = \frac{Y}{y} \Rightarrow \begin{array}{l} X = \frac{x}{y} \cdot Y \\ Y = Y \\ Z = \frac{z}{y} \cdot Y \end{array} \quad (\text{C.9})$$

Aus Umformung der Gleichungen C.6 bis C.9 ergibt sich die Transformationsmatrix M , mit deren Inversen für eine gewünschte Farbvalenz F_{ges} die einzelnen Leuchtdichten der vom Projektor erzeugten Primärvalenzen berechnet werden können [52].

$$\begin{bmatrix} X_{Ges} \\ Y_{Ges} \\ Z_{Ges} \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} \frac{x_R}{y_R} & \frac{x_G}{y_G} & \frac{x_B}{y_B} \\ 1 & 1 & 1 \\ \frac{z_R}{y_R} & \frac{z_G}{y_G} & \frac{z_B}{y_B} \end{bmatrix}}_M \cdot \begin{bmatrix} Y_R \\ Y_G \\ Y_B \end{bmatrix} \quad (\text{C.10})$$

Analog zu den LED-Datenblättern der Hersteller werden für die Berechnung der simulierten Farbwerte $X_{soll}, Y_{soll}, Z_{soll}$ die Leuchtdichte L_{soll} und die jeweiligen Farbwertanteile x_{soll}, y_{soll} der Farbvalenz definiert.

$$\begin{bmatrix} Y_R \\ Y_G \\ Y_B \end{bmatrix} = M^{-1} \cdot \begin{bmatrix} X_{Ges} \\ Y_{Ges} \\ Z_{Ges} \end{bmatrix} \quad (\text{C.11})$$

$$X_{Ges} = \frac{x_{soll}}{y_{soll}} \cdot L_{soll} \quad (\text{C.12})$$

$$Y_{Ges} = L_{soll} \quad (\text{C.13})$$

$$Z_{Ges} = \frac{1 - x_{soll} - y_{soll}}{y_{soll}} \cdot L_{soll} \quad (\text{C.14})$$

Während der Versuche sollen dem Probanden farbig leuchtende Tagfahrlichtringe mit einer konstanten Leuchtdichte dargeboten werden. Mit der windowsbasierten Ansteuerung der Projektoren mit Powerpoint können eine hohe Reproduzierbarkeit, Konstanz und Genauigkeit der eingestellten Leuchtdichten sowie Farborte gewährleistet werden. Für jede windowsseitige RGB-Einstellung ist die inverse Transformationsmatrix M^{-1} aus Gleichung C.9 auf Grund der vorangehenden spektralen Analyse ermittelbar. Aus den Sollvorgaben bezüglich der mittleren Leuchtdichte L_{soll} und dem Farbort x_{soll}, y_{soll} können mit Gleichung C.9 die Leuchtdichten der projektorseitigen Primärfarben Rot, Grün und Blau bestimmt werden. Für diese Leuchtdichten müssen geeignete RGB Steuerwerte gefunden werden. Dies erfolgt mit den in Abbildung 4.8

ermittelten Kennlinien. Die mathematische Beschreibung der Kennlinien in Gleichung C.15 bis C.20 erfolgt für beide Projektoren und jede Primärfarbe separat mit Hilfe einer polynomischen Regression und besitzt für alle Kennlinien einen Korrelationskoeffizienten größer als 0,999. Als Datenbasis dienen die gemessenen Farborte der Farbvalenzen Rot, Grün und Blau (Rot und Blau 155 Daten; Grün 175 Daten). Die Indizes $\ddot{A}R$ und IR kennzeichnen den äußeren und den inneren Tagfahrlichtring.

$$R_{\text{Windows } \ddot{A}R} = -0,0135 \cdot L^2 + 4,1976 \cdot L + 26,434 \quad (\text{C.15})$$

$$G_{\text{Windows } \ddot{A}R} = -0,0008 \cdot L^2 + 0,9071 \cdot L + 35,214 \quad (\text{C.16})$$

$$B_{\text{Windows } \ddot{A}R} = -0,1096 \cdot L^2 + 10,954 \cdot L + 31,795 \quad (\text{C.17})$$

$$R_{\text{Windows } IR} = -0,0181 \cdot L^2 + 4,1094 \cdot L + 44,306 \quad (\text{C.18})$$

$$G_{\text{Windows } IR} = -0,0012 \cdot L^2 + 1,0668 \cdot L + 40,256 \quad (\text{C.19})$$

$$B_{\text{Windows } IR} = -0,1937 \cdot L^2 + 13,26 \cdot L + 36,368 \quad (\text{C.20})$$

Trotz der hohen Korrelationskoeffizienten weichen die berechneten von den gemessenen Helligkeitswerten ab. Für die Verringerung der Sollwertabweichung werden die RGB-Steuerwerte durch eine frei wählbare Anzahl an Iterationsschritten bestimmt. Bei jedem Iterationsschritt wird die inverse Transformation M^{-1} angepasst. Beim ersten Iterationsschritt bilden die Mittelwerte der Farbwertanteile die Ursprungsmatrix.

Wie Abbildung C.7 beispielhaft zeigt, ist der Vergleich zwischen den Sollwertvorgaben und den berechneten Werten mit den mit Index MW gezeichneten Rückgabenwerten der Leuchtdichte und der Farbortanteile möglich. Sowohl die Sollwerte als auch die berechneten Werte werden in den gleichabständigen $Lu'v'$ Farbraum mit den Gleichungen C.21 und C.22 nach DIN 5033 transformiert [29].

$$u' = \frac{4 \cdot x}{-2 \cdot x + 12 \cdot y + 3} \quad (\text{C.21})$$

$$v' = \frac{9 \cdot y}{-2 \cdot x + 12 \cdot y + 3} \quad (\text{C.22})$$

Diese Werte werden im Nachfolgenden zusätzlich zur Generierung der optimalen RGB-Steuerwerte verwendet. Zur weiteren Erhöhung der Genauigkeit zwischen dem Sollwert und

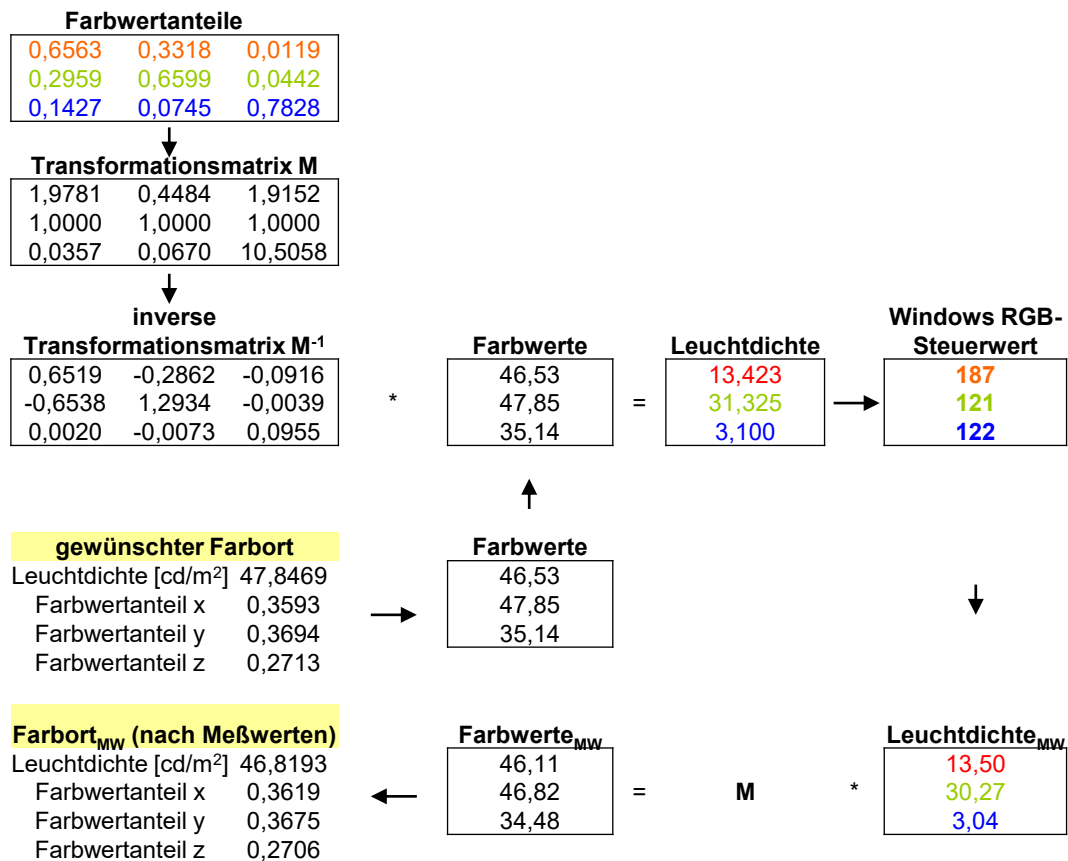


Abbildung C.7: Darstellung des Farbmischalgorithmus

dem berechneten Wert wird um den Sollwert ein Raster von Farborten mit gleicher Leuchtdichte gebildet. Der Rasterpunkt mit dem kleinsten euklidischen $\Delta u'v'$ Abstand zum Sollwert wird gemäß Gleichung C.23 als endgültiger berechneter Wert verwendet.

$$\Delta u'v' = \sqrt{(u'_{Soll} - u'_{Gitter})^2 + (v'_{Soll} - v'_{Gitter})^2} \quad (C.23)$$

C.4 Fehlerbetrachtung des Positionslicht-Warmerscheinungsbildsimulators

Zur Fehlerbetrachtung des Systems muss zwischen drei Werten unterschieden werden. Diese sind die Soll-Farborte (x_{soll}, y_{soll}), die aus den Kalibrierdaten berechneten Farborte (x_{cal}, y_{cal}) und die gemessenen Farborte (x_{mess}, y_{mess}) aus weiteren Messungen (siehe Abbildung 4.11). Daher wurden für die Fehlerbetrachtung im Zuge der vorangegangenen Kalibrierung der beiden Positionslichtringe sowohl unifarbigen Powerpointfolien aus einer Primärfarbe (z.B. R=150, G=0, B=0) als auch mit mehreren Primärfarben (z.B. R=150, G=100, B=102) vermessen. So

Tabelle C.1: Abweichung zwischen berechnetem Wert und Messwert beim inneren Ring

	Testfarbvalenz	x	y	L in [cd/m ²]	Δxy	ΔL in %
Berechneter Wert	1	0,3110	0,3543	86,3741	-	-
Messwert	1	0,3116	0,3548	86,1937	0,0007	0,2089
Berechneter Wert	2	0,3114	0,3387	57,7631	-	-
Messwert	2	0,3118	0,3395	57,7068	0,0009	0,0975
Berechneter Wert	3	0,3230	0,3882	74,8096	-	-
Messwert	3	0,3229	0,3882	74,3956	0,0001	0,5535
Berechneter Wert	4	0,3066	0,3288	32,5066	-	-
Messwert	4	0,3063	0,3292	32,0825	0,0005	1,3046
Berechneter Wert	5	0,3072	0,3673	36,6684	-	-
Messwert	5	0,3071	0,3687	36,3357	0,0014	0,9074

Tabelle C.2: Abweichung zwischen berechnetem Wert und Messwert beim äußeren Ring

	Testfarbvalenz	x	y	L in [cd/m ²]	Δxy	ΔL in %
Berechneter Wert	1	0,3068	0,3590	82,7007	-	-
Messwert	1	0,3064	0,3597	82,744	0,0008	-0,0522
Berechneter Wert	2	0,3075	0,3398	56,5838	-	-
Messwert	2	0,3064	0,3397	56,038	0,0011	0,9641
Berechneter Wert	3	0,3170	0,3879	72,9871	-	-
Messwert	3	0,3163	0,3872	72,396	0,0010	0,8100
Berechneter Wert	4	0,3050	0,3244	33,9531	-	-
Messwert	4	0,3037	0,3248	33,633	0,0013	0,9439
Berechneter Wert	5	0,3068	0,3603	38,1487	-	-
Messwert	5	0,3051	0,3604	37,630	0,0017	1,3595

wurde gewährleistet, dass für jede Farbkombination dieselben Messregionen vom Spektrometer vermessen wurden.

Die Tabellen C.1 und C.2 zeigen für insgesamt fünf Mischfarben die Abweichung Δxy zwischen den aus dem Mischalgorithmus berechneten Farbwertanteilen (x_{cal}, y_{cal}) und den gemessenen Farbwertanteilen (x_{mess}, y_{mess}). Die maximale $\Delta xy_{cal-mess}$ Abweichung zwischen Ist-Wert und berechnetem Wert beider Ringe liegt bei $\pm 0,00085$. Der Leuchtdichteunterschied ist maximal 1,35 %. Zusätzlich muss die Messtoleranz des verwendeten Spektrometers von $\Delta xy_{Spektrometer} = \pm 0,002$ berücksichtigt werden (siehe Anhang A). Somit ergibt sich ein Gesamtfehler von $\Delta xy_{cal-mess-Spektrometer} = \pm 0,00285$. Die Abweichung zwischen dem angestrebten Sollwert und dem berechneten Wert beinhaltet den Diskretisierungsfehler und liegt bei durchschnittlich bei $\Delta xy_{Soll-Cal} = 0,0009$. Voruntersuchungen mit dem Versuchsaufbau bestätigen, dass die Farbdiskrimination des Auges geringer ist als $\Delta xy_{Soll-Cal} = 0,0009$. Eine mehr als ausreichende Genauigkeit ist somit für die Untersuchungen von Farbunterschieden mit Hilfe des PWSs gegeben.

C.5 Probandenergebnisse

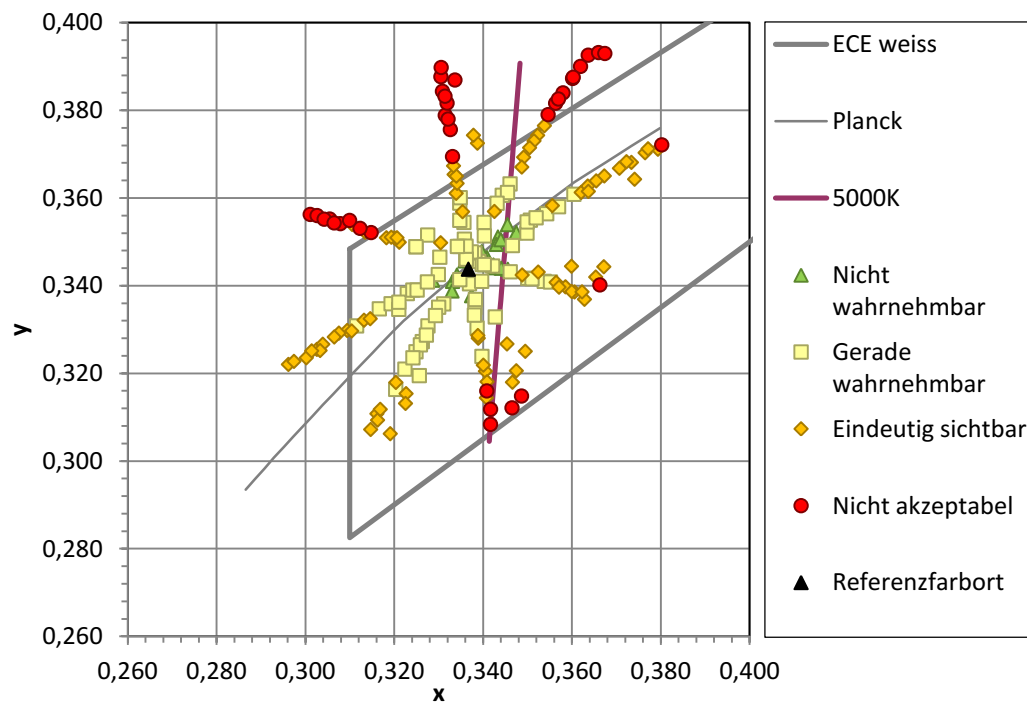


Abbildung C.8: Darstellung der Probandenergebnisse aus Teilversuch 2 mit dem PWS in der CIE xy-Farbtabelle

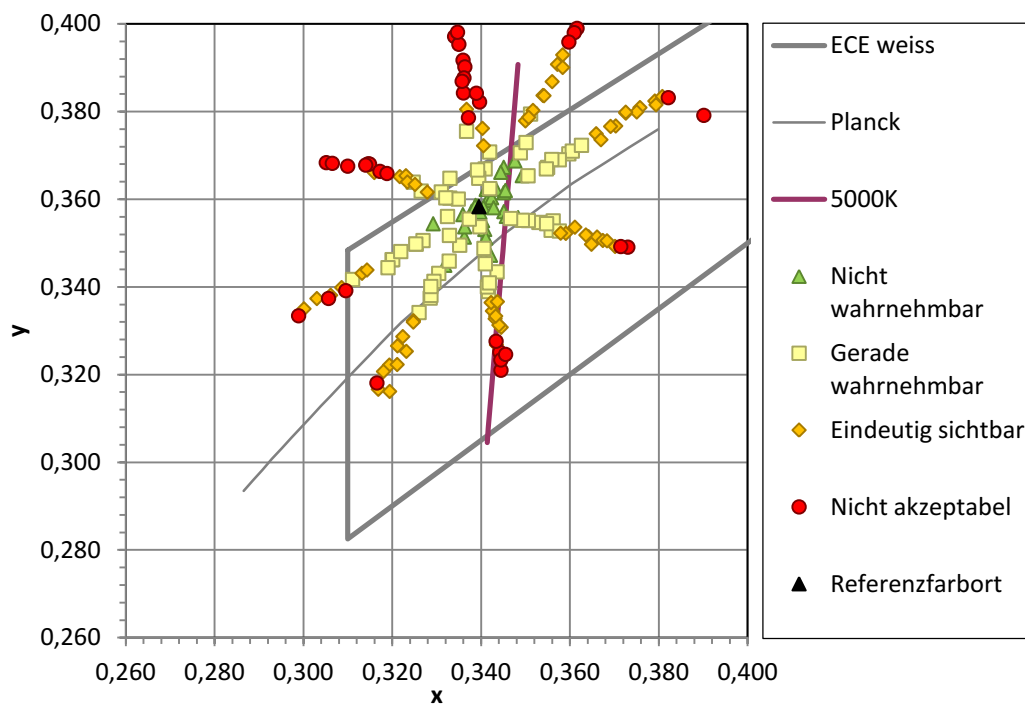


Abbildung C.9: Darstellung der Probandenergebnisse aus Teilversuch 3 mit dem PWS in der CIE xy-Farbtabelle

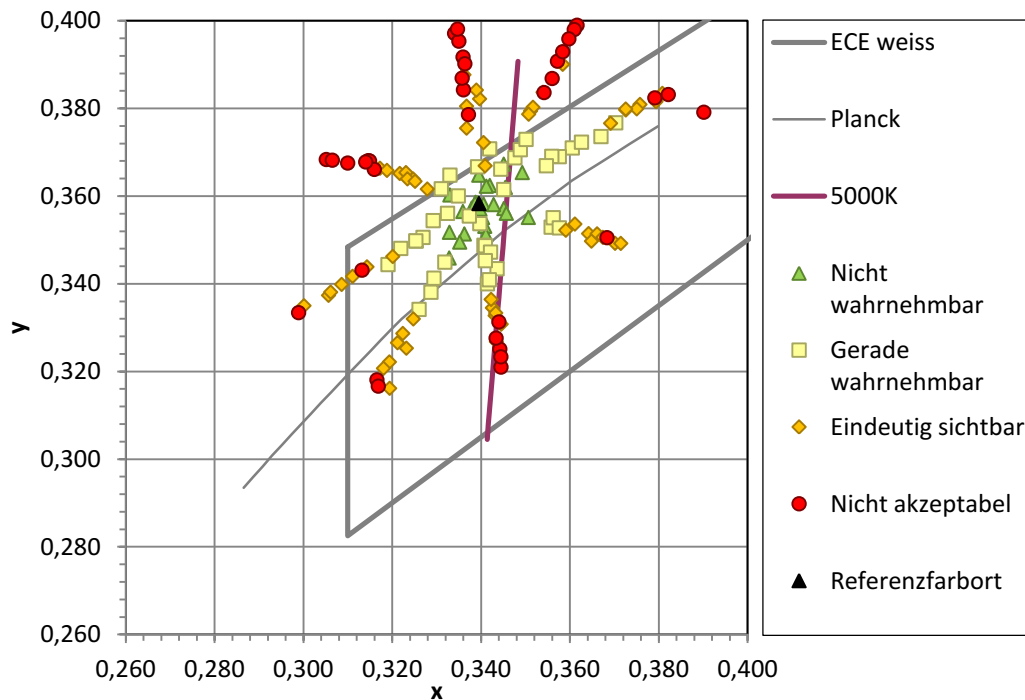


Abbildung C.10: Darstellung der Probandenergebnisse aus Teilversuch 4 mit dem PWS in der CIE xy-Farbtabelle

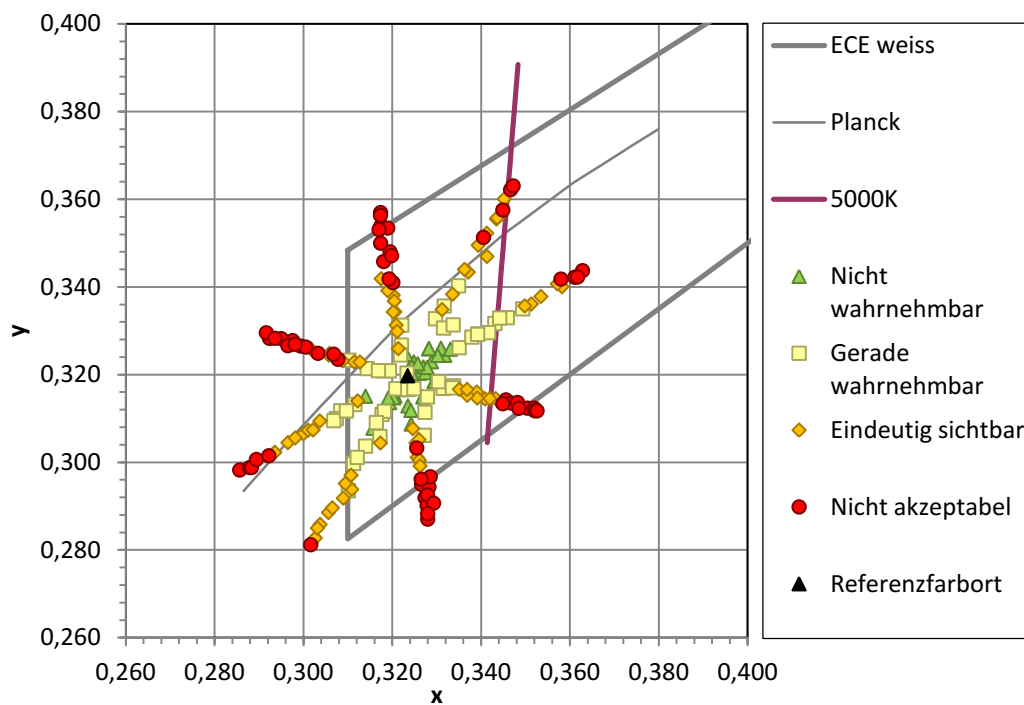


Abbildung C.11: Darstellung der Probandenergebnisse aus Teilversuch 5 mit dem PWS in der CIE xy-Farbtafel

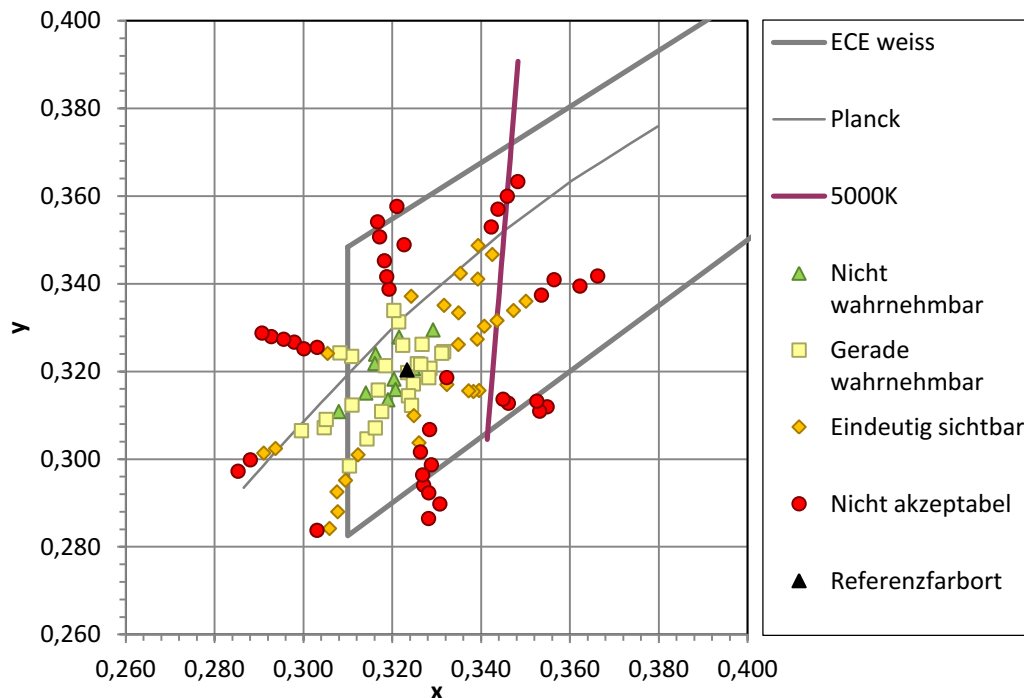


Abbildung C.12: Darstellung der Probandenergebnisse aus Teilversuch 6 mit dem PWS in der CIE xy-Farbtafel

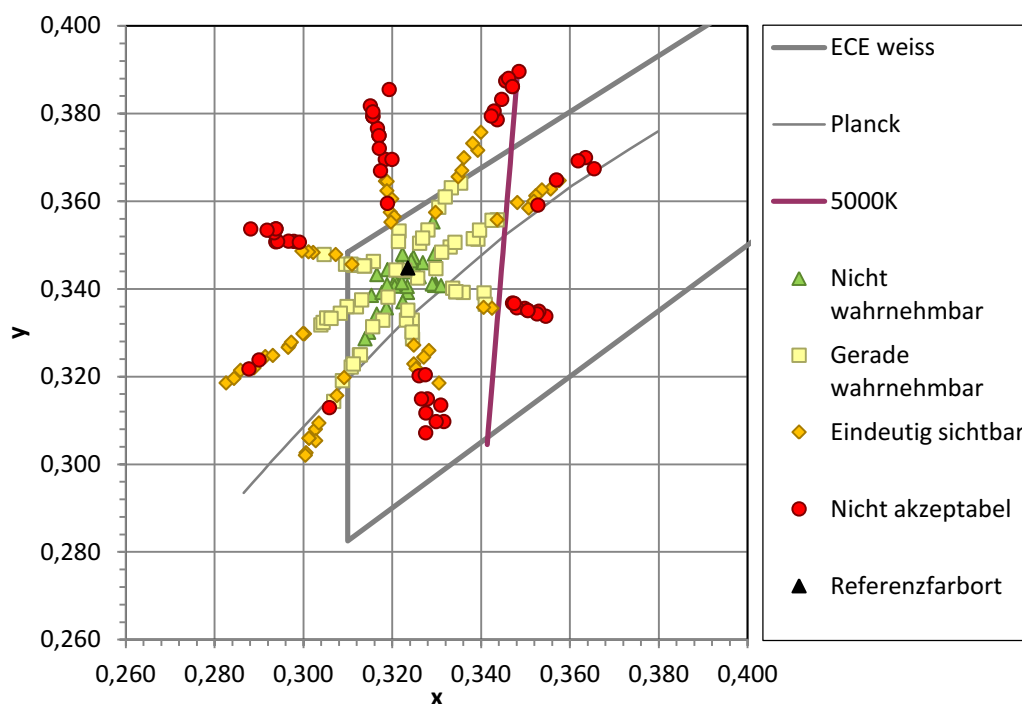


Abbildung C.13: Darstellung der Probandenergebnisse aus Teilversuch 7 mit dem PWS in der CIE xy-Farbtafel

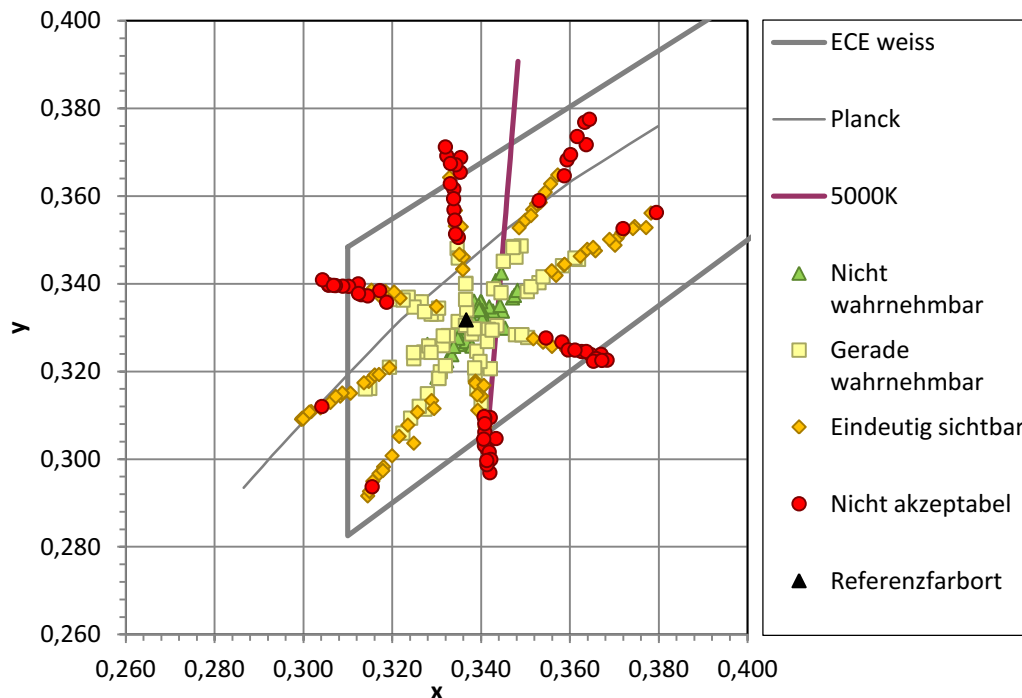


Abbildung C.14: Darstellung der Probandenergebnisse aus Teilversuch 8 mit dem PWS in der CIE xy-Farbtafel

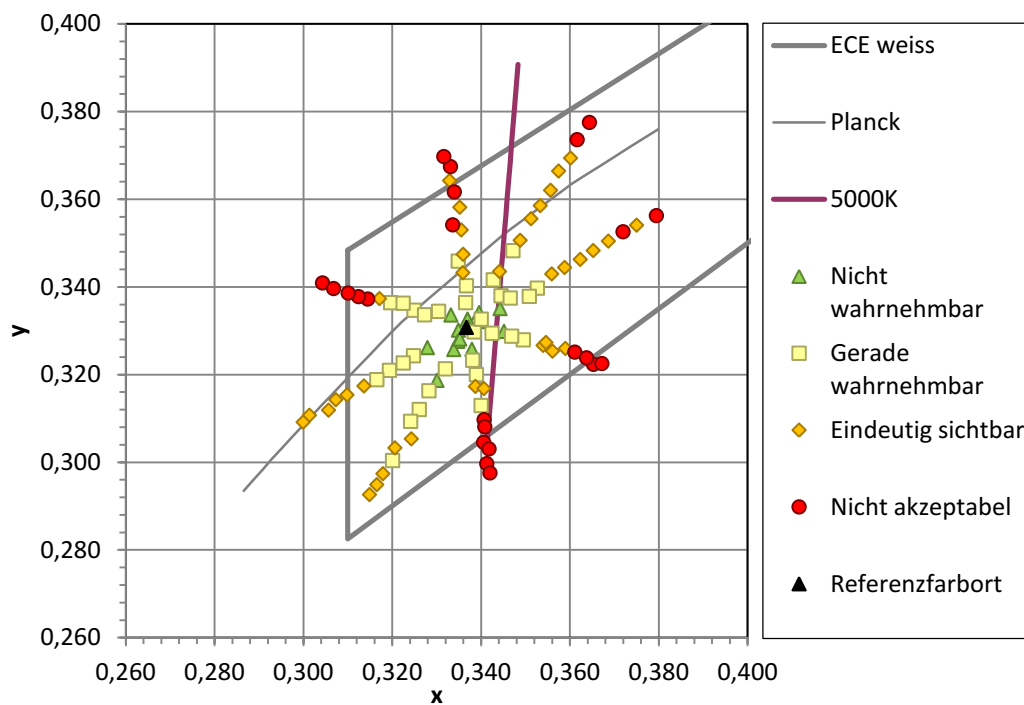


Abbildung C.15: Darstellung der Probandenergebnisse aus Teilversuch 9 mit dem PWS in der CIE xy-Farbtafel

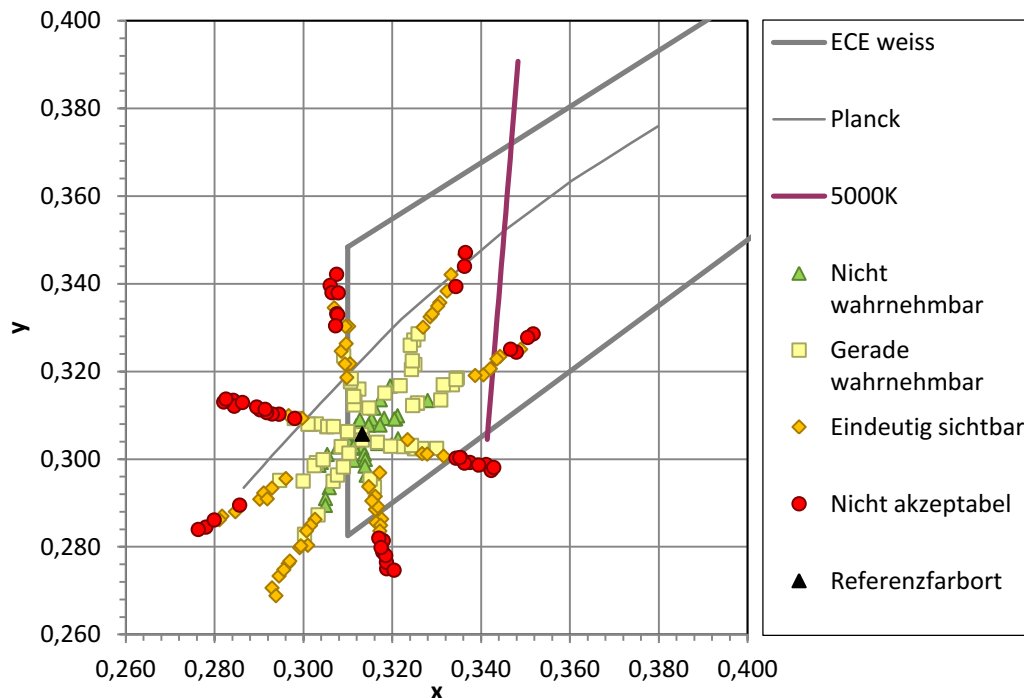


Abbildung C.16: Darstellung der Probandenergebnisse aus Teilversuch 10 mit dem PWS in der CIE xy-Farbtafel

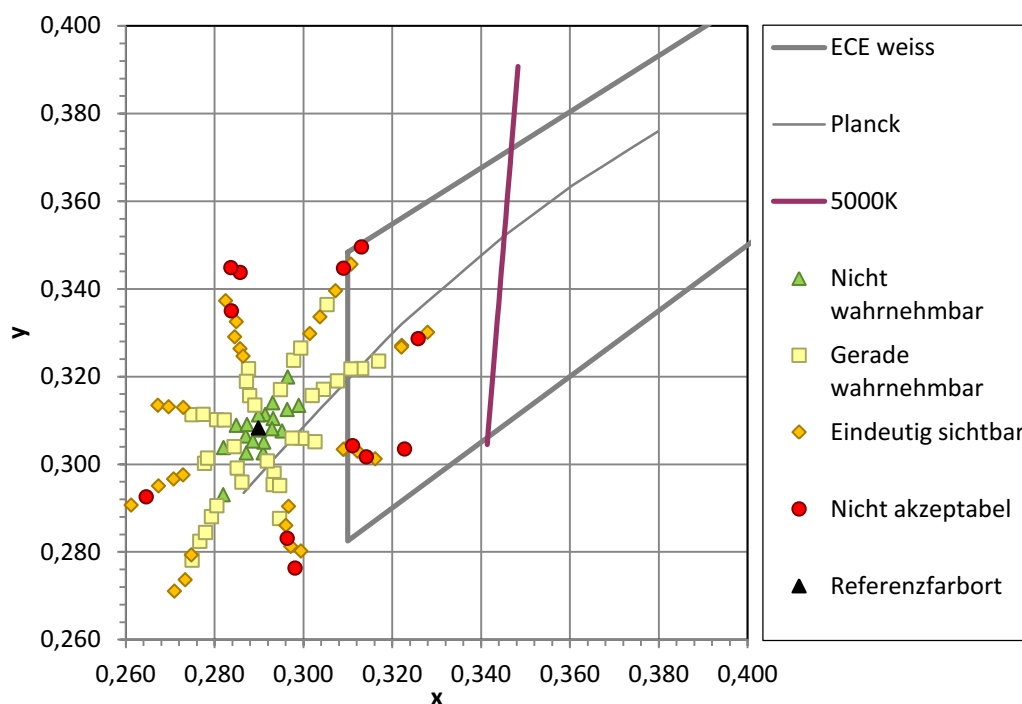


Abbildung C.17: Darstellung der Probandenergebnisse aus Teilversuch 11 mit dem PWS in der CIE xy-Farbtafel

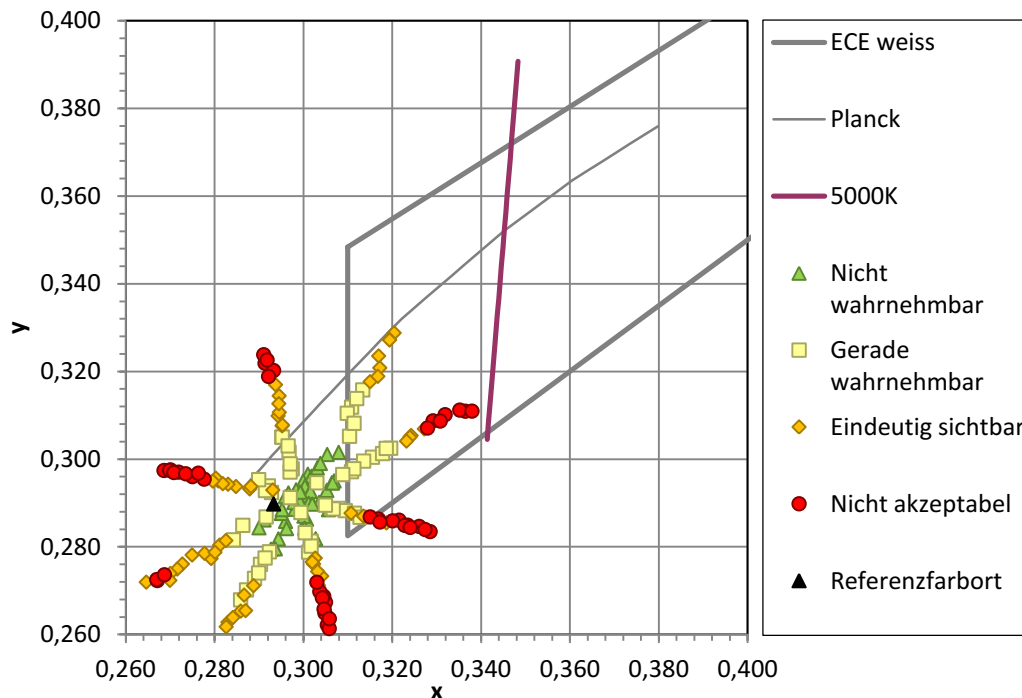


Abbildung C.18: Darstellung der Probandenergebnisse aus Teilversuch 12 mit dem PWS in der CIE xy-Farbtafel

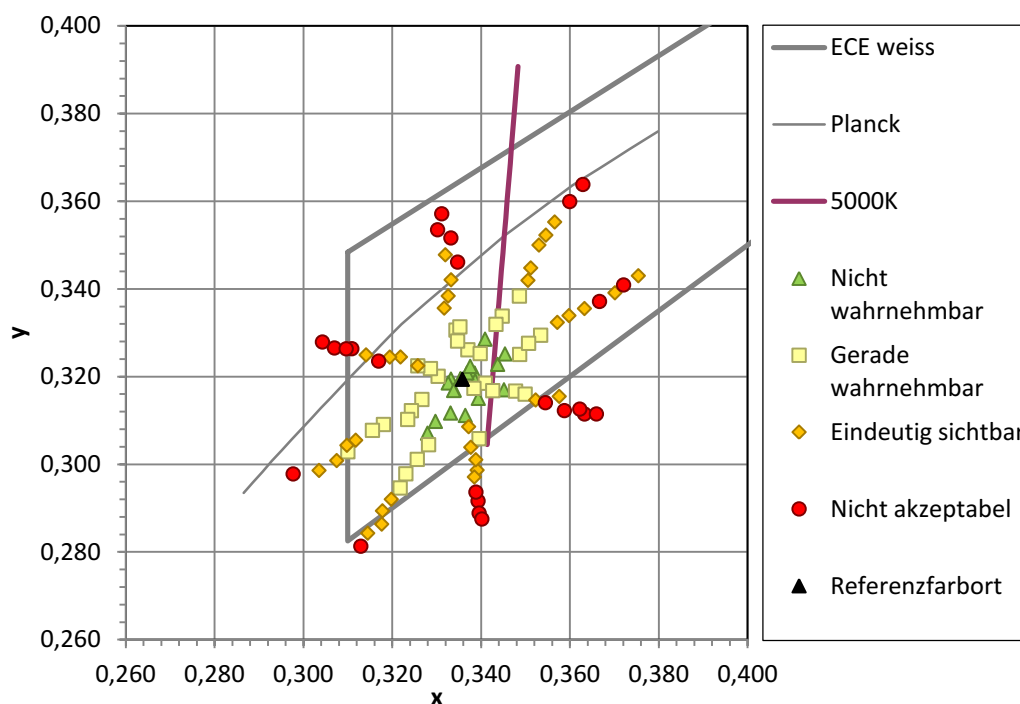


Abbildung C.19: Darstellung der Probandenergebnisse aus Teilversuch 13 mit dem PWS in der CIE xy-Farbtafel

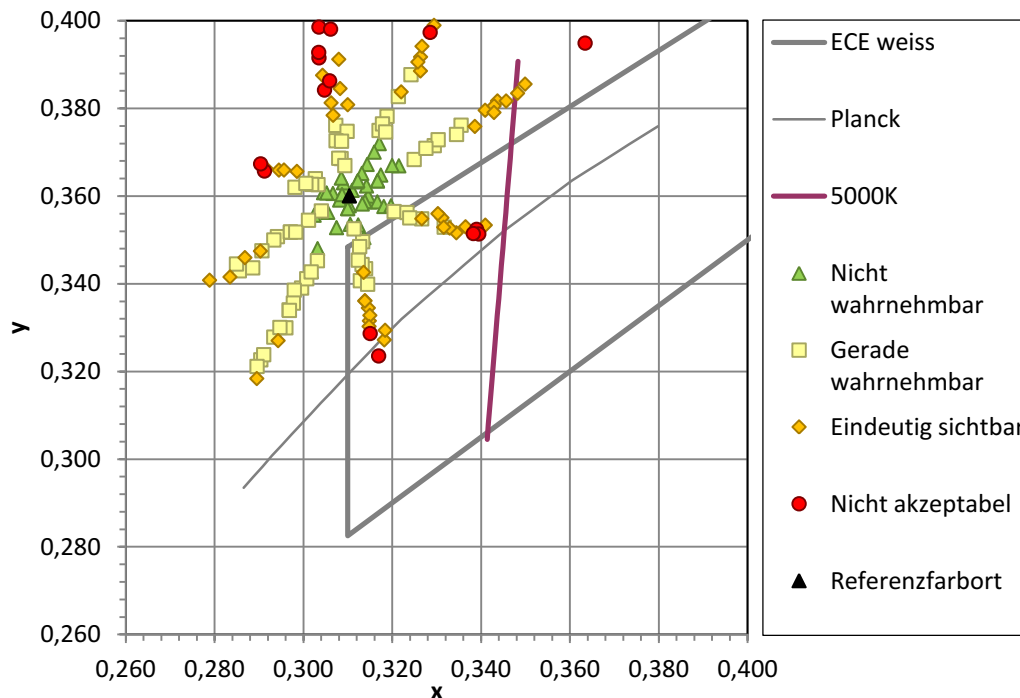


Abbildung C.20: Darstellung der Probandenergebnisse aus Teilversuch 14 mit dem PWS in der CIE xy-Farbtafel

C.6 Eingangsgrößen - Grenzellipsenapproximation

Tabelle C.3: Farborte zur Bestimmung der Ellipsenparameter in der CIE xy-Farbtafel

Teilversuch 1		Teilversuch 2		Teilversuch 3		Teilversuch 4		Teilversuch 5		Teilversuch 6		Teilversuch 7	
x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y
0,3181	0,3432	0,3340	0,3611	0,3405	0,3722	0,3405	0,3722	0,3211	0,3299	0,3243	0,3372	0,3204	0,3564
0,3063	0,3357	0,3211	0,3499	0,3279	0,3616	0,3279	0,3616	0,3115	0,3229	0,3054	0,3241	0,3073	0,3479
0,3046	0,3222	0,3132	0,3321	0,3143	0,3439	0,3201	0,3462	0,3037	0,3094	0,2937	0,3024	0,3002	0,3298
0,3045	0,3041	0,3204	0,3179	0,3248	0,3323	0,3248	0,3320	0,3107	0,2970	0,3123	0,3010	0,3092	0,3198
0,3230	0,3132	0,3389	0,3280	0,3423	0,3364	0,3423	0,3364	0,3260	0,3052	0,3249	0,3099	0,3249	0,3272
0,3403	0,3257	0,3564	0,3408	0,3591	0,3522	0,3591	0,3522	0,3351	0,3166	0,3323	0,3170	0,3406	0,3358
0,3508	0,3493	0,3621	0,3613	0,3659	0,3749	0,3692	0,3766	0,3498	0,3357	0,3348	0,3261	0,3436	0,3558
0,3311	0,3529	0,3487	0,3671	0,3500	0,3779	0,3507	0,3787	0,3371	0,3434	0,3317	0,3351	0,3348	0,3656

Teilversuch 8		Teilversuch 9		Teilversuch 10		Teilversuch 11		Teilversuch 12		Teilversuch 13		Teilversuch 14	
x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y
0,3359	0,3434	0,3349	0,3459	0,3098	0,3186	0,2864	0,3247	0,2943	0,3057	0,3317	0,3356	0,3067	0,3784
0,3218	0,3367	0,3218	0,3353	0,2997	0,3093	0,2730	0,3130	0,2899	0,2953	0,3258	0,3225	0,2981	0,3620
0,3194	0,3209	0,3165	0,3188	0,2961	0,2956	0,2729	0,2976	0,2842	0,2816	0,3118	0,3055	0,2903	0,3475
0,3289	0,3134	0,3261	0,3120	0,3032	0,2857	0,2748	0,2793	0,2867	0,2690	0,3198	0,2920	0,2961	0,3300
0,3387	0,3178	0,3407	0,3097	0,3147	0,2937	0,2967	0,2904	0,3036	0,2768	0,3376	0,3039	0,3145	0,3399
0,3518	0,3275	0,3540	0,3267	0,3267	0,3013	0,3092	0,3035	0,3117	0,2881	0,3523	0,3147	0,3266	0,3548
0,3569	0,3419	0,3559	0,3430	0,3334	0,3173	0,3221	0,3271	0,3196	0,3025	0,3572	0,3324	0,3355	0,3762
0,3486	0,3528	0,3472	0,3483	0,3269	0,3301	0,3014	0,3298	0,3138	0,3163	0,3506	0,3420	0,3242	0,3877

Tabelle C.4: Farborte zur Bestimmung der Ellipsenparameter in der CIE $u'v'$ -Farbtafel

Teilversuch 1		Teilversuch 2		Versuch 3		Versuch 4		Versuch 5		Versuch 6		Versuch 7	
u'	v'	u'	v'	u'	v'	u'	v'	u'	v'	u'	v'	u'	v'
0,1963	0,4765	0,2004	0,4876	0,2008	0,4937	0,2008	0,4937	0,2034	0,4700	0,2028	0,4743	0,1931	0,4834
0,1910	0,4709	0,1959	0,4803	0,1962	0,4869	0,1962	0,4869	0,1993	0,4648	0,1946	0,4646	0,1874	0,4773
0,1947	0,4634	0,1970	0,4701	0,1935	0,4763	0,1966	0,4783	0,1990	0,4561	0,1945	0,4505	0,1889	0,4669
0,2017	0,4531	0,2075	0,4634	0,2050	0,4719	0,2051	0,4717	0,2092	0,4498	0,2086	0,4524	0,1989	0,4628
0,2114	0,4612	0,2166	0,4717	0,2155	0,4766	0,2155	0,4766	0,2170	0,4570	0,2141	0,4596	0,2070	0,4691
0,2185	0,4707	0,2236	0,4810	0,2207	0,4870	0,2207	0,4870	0,2187	0,4649	0,2165	0,4647	0,2146	0,4761
0,2162	0,4844	0,2191	0,4918	0,2163	0,4986	0,2178	0,4998	0,2211	0,4774	0,2145	0,4701	0,2088	0,4865
0,2015	0,4832	0,2080	0,4925	0,2048	0,4976	0,2050	0,4981	0,2092	0,4794	0,2087	0,4744	0,1994	0,4898

Versuch 8		Versuch 9		Versuch 10		Versuch 11		Versuch 12		Versuch 13		Versuch 14	
u'	v'	u'	v'	u'	v'	u'	v'	u'	v'	u'	v'	u'	v'
0,2083	0,4792	0,2067	0,4803	0,1997	0,4622	0,1812	0,4621	0,1936	0,4525	0,2085	0,4746	0,1771	0,4916
0,2012	0,4737	0,2018	0,4730	0,1961	0,4555	0,1758	0,4536	0,1944	0,4456	0,2095	0,4667	0,1767	0,4828
0,2056	0,4649	0,2044	0,4634	0,1989	0,4467	0,1812	0,4445	0,1957	0,4362	0,2064	0,4550	0,1762	0,4746
0,2156	0,4621	0,2141	0,4610	0,2083	0,4416	0,1894	0,4333	0,2028	0,4281	0,2181	0,4481	0,1860	0,4664
0,2208	0,4661	0,2258	0,4619	0,2135	0,4484	0,2014	0,4436	0,2125	0,4360	0,2261	0,4580	0,1950	0,4743
0,2260	0,4734	0,2279	0,4733	0,2192	0,4548	0,2053	0,4535	0,2138	0,4444	0,2321	0,4664	0,1978	0,4835
0,2234	0,4816	0,2223	0,4820	0,2172	0,4650	0,2051	0,4687	0,2134	0,4544	0,2277	0,4768	0,1961	0,4947
0,2133	0,4858	0,2141	0,4833	0,2073	0,4710	0,1897	0,4671	0,2035	0,4615	0,2190	0,4807	0,1852	0,4982

C.7 Ellipsenapproximation

C.7.1 Rücktransformationalgorithmus

Gleichung 3.4 beschreibt die allgemeine Ellipsengleichung in konischer Darstellung. Die zu bestimmenden Ellipsen liegen in der Regel nicht im Ursprung des Koordinatensystems und sind Raum gedreht. Daher muss zunächst für die Bestimmung der Ellipsenparameter a , b , x_0 und y_0 die Ellipsenneigung ermittelt werden. Die Bestimmung der Ellipsenneigung ϕ erfolgt aus g_{11} bis g_{23} gemäß Gleichung C.24 [14].

$$\phi = 1/2 \cdot \arctan \left(\frac{g_{12}}{g_{12} - g_{11}} \right) \quad (\text{C.24})$$

Um die weiteren Ellipsenparameter a , b , x_0 und y_0 ermitteln zu können, muss die Neigung der Ellipse eliminiert werden. Die Orientierung der Ellipse wird durch eine Substitution beseitigt (siehe Gleichung C.25) [14].

$$g_{11}'x^2 + g_{12}'xy + g_{22}'y^2 + g_{13}'x + g_{23}'y = 1 \quad (\text{C.25})$$

Hierbei wird x durch $\cos(\phi)x + \sin(\phi)y$ und y durch $-\sin(\phi)x + \cos(\phi)y$ substituiert, so dass die Parameter g_{11}' bis g_{23}' nach verschiedenen Vereinfachungen wie folgt bestimmt werden können:

$$g_{11}' = g_{11} \cdot \cos(\phi)^2 - g_{12} \cdot \cos(\phi) \cdot \sin(\phi) + g_{22} \cdot \sin(\phi)^2 \quad (\text{C.26})$$

$$g_{12}' = 2g_{11} \cdot \cos(\phi) \cdot \sin(\phi) + (\cos(\phi)^2 - \sin(\phi)^2) \cdot g_{12} - 2 \cdot g_{22} \cdot \cos(\phi) \cdot \sin(\phi) = 0 \quad (\text{C.27})$$

$$g_{13}' = g_{13} \cdot \cos(\phi) - g_{23} \cdot \sin(\phi) \quad (\text{C.28})$$

$$g_{22}' = g_{11} \cdot \sin(\phi)^2 + g_{12} \cdot \cos(\phi) \cdot \sin(\phi) + g_{22} \cdot \cos(\phi)^2 \quad (\text{C.29})$$

$$g_{23}' = g_{13} \cdot \sin(\phi) + g_{23} \cdot \cos(\phi) \quad (\text{C.30})$$

Mit einer quadratischen Ergänzung kann ein Parameter g_{23}'' so definiert werden, dass mit diesem die Ellipsenparameter a , b , x_0 und y_0 mit Gleichungen C.31 bis C.35 berechnet werden können [14].

$$g_{23}'' = \frac{g_{13}'^2}{4 \cdot g_{11}'} + \frac{g_{23}'^2}{4 \cdot g_{22}'} \quad (\text{C.31})$$

$$x_0 = \bar{x} - \frac{g_{13}'}{2 \cdot g_{11}'} \quad (C.32)$$

$$y_0 = \bar{y} - \frac{g_{23}'}{2 \cdot g_{22}'} \quad (C.33)$$

$$a = \sqrt{g_{23}''/g_{11}'} \quad (C.34)$$

$$b = \sqrt{g_{23}''/g_{22}'} \quad (C.35)$$

C.7.2 Ellipsenapproximation mit den PSW-V Versuchsergebnissen

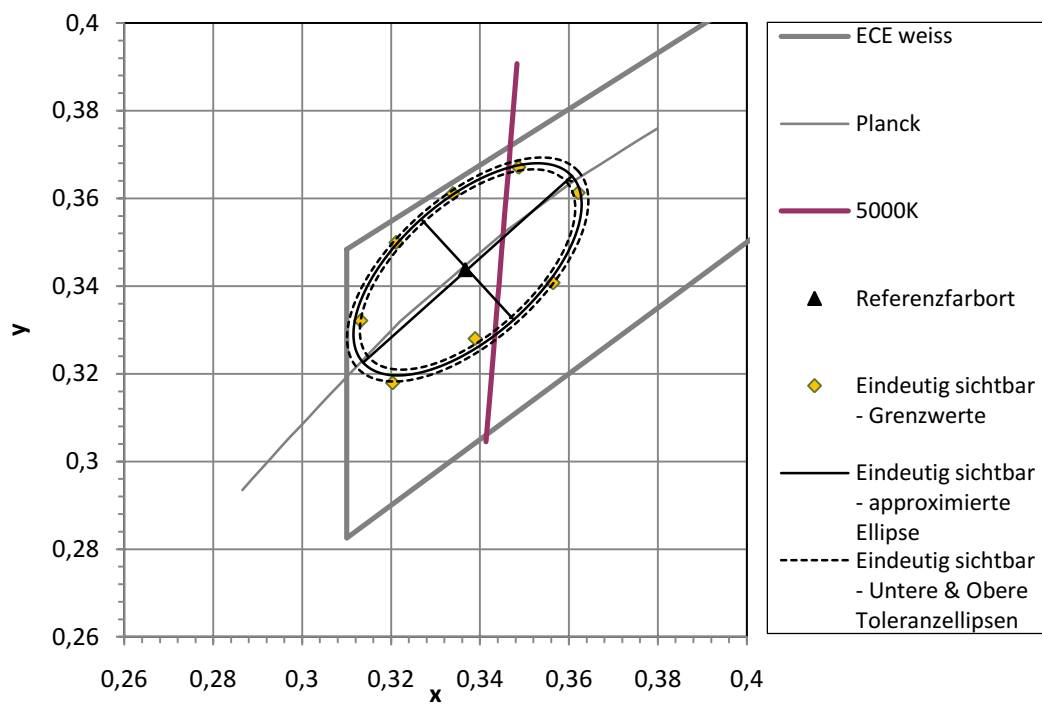


Abbildung C.21: Darstellung der Farbortgrenzwerte und der approximierten Ellipse von Teilversuch 2 in der CIE xy-Farbtabelle

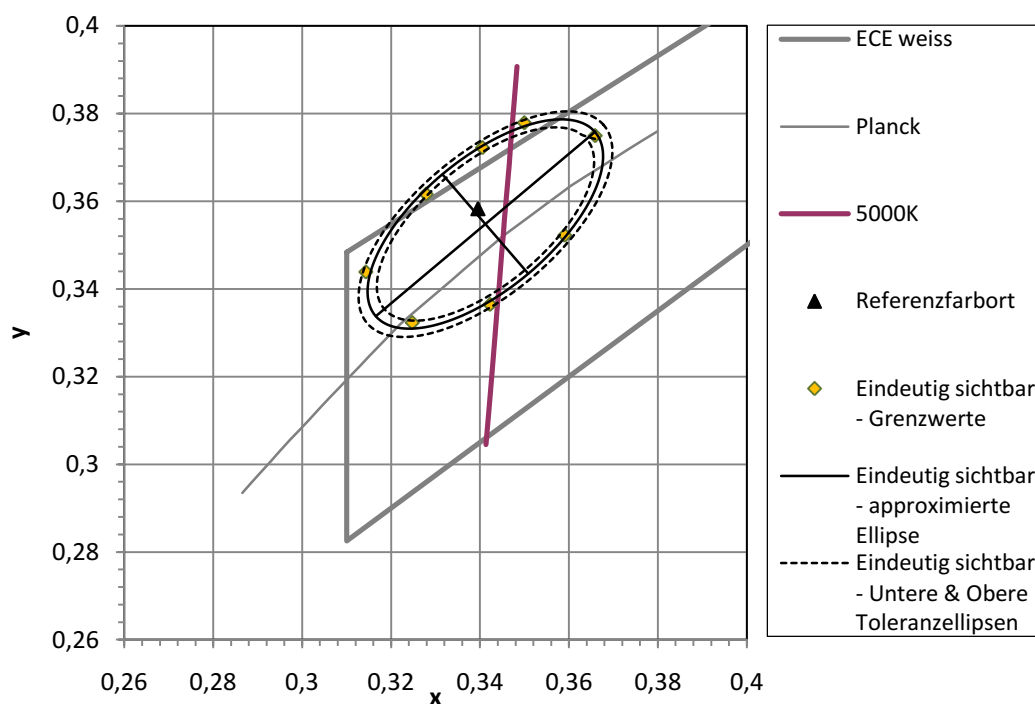


Abbildung C.22: Darstellung der Farbortgrenzwerte und der approximierten Ellipse von Teilversuch 3 in der CIE xy-Farbtafel

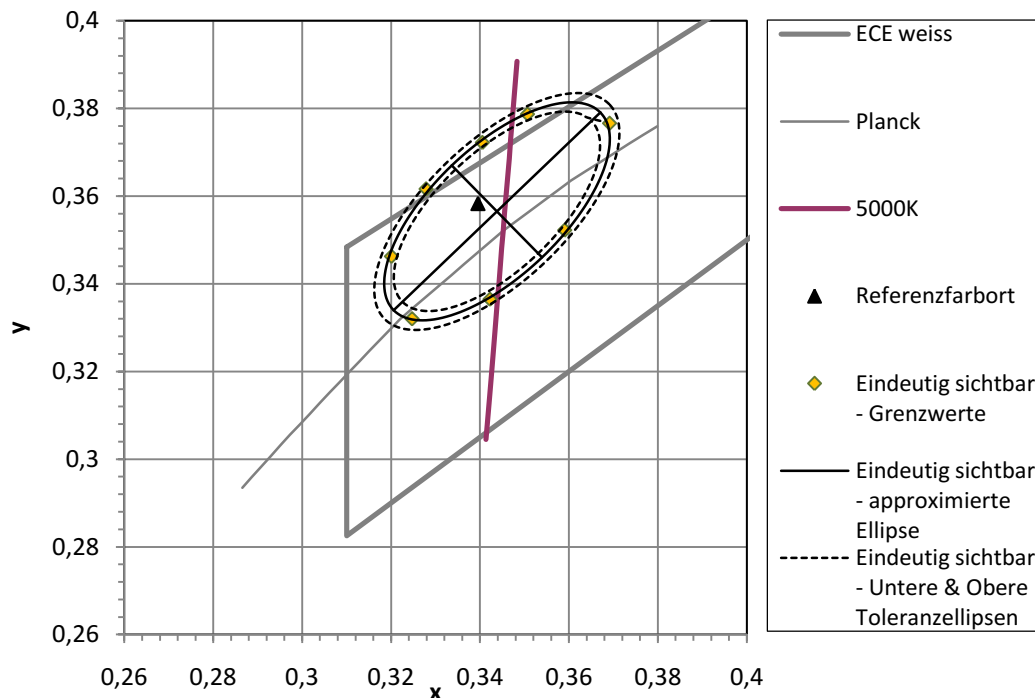


Abbildung C.23: Darstellung der Farbortgrenzwerte und der approximierten Ellipse von Teilversuch 4 in der CIE xy-Farbtafel

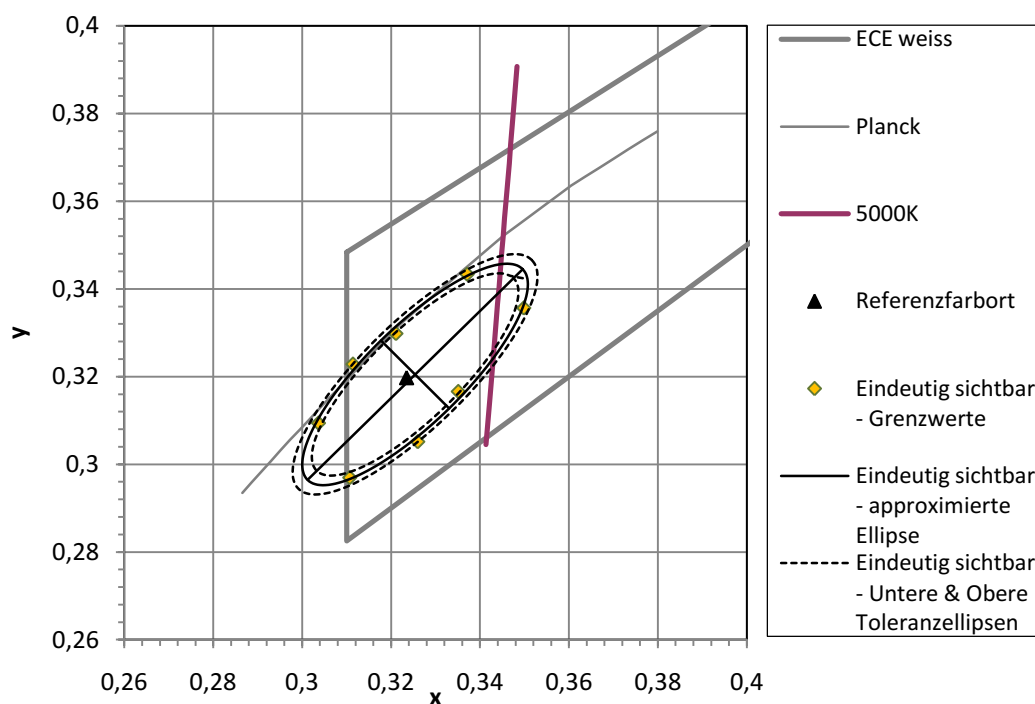


Abbildung C.24: Darstellung der Farbortgrenzwerte und der approximierten Ellipse von Teilversuch 5 in der CIE xy-Farbtabelle

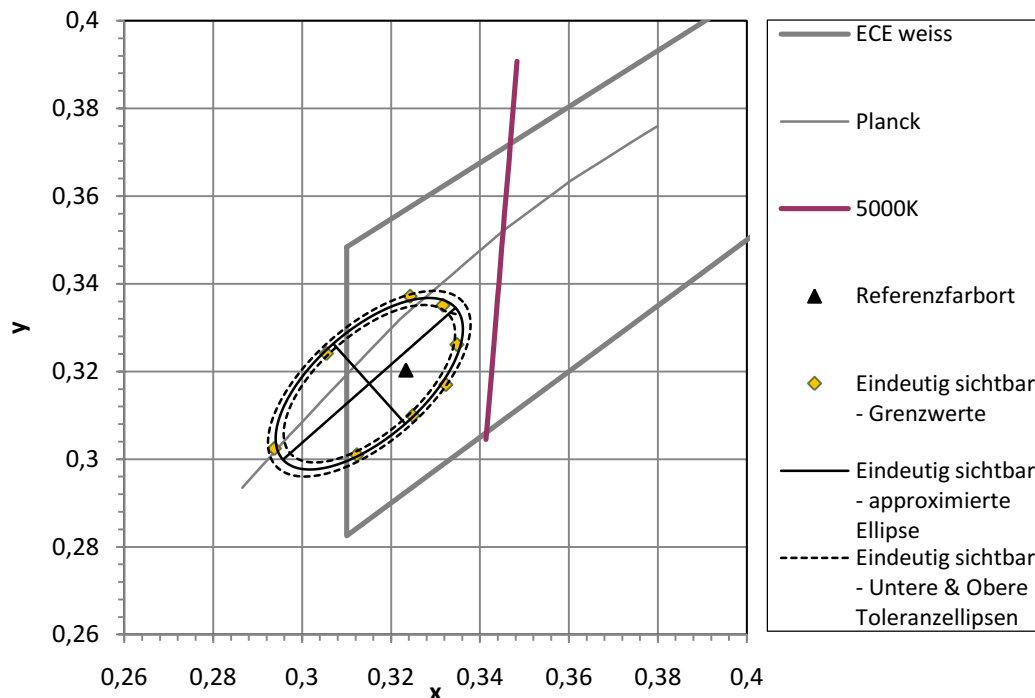


Abbildung C.25: Darstellung der Farbortgrenzwerte und der approximierten Ellipse von Teilversuch 6 in der CIE xy-Farbtabelle

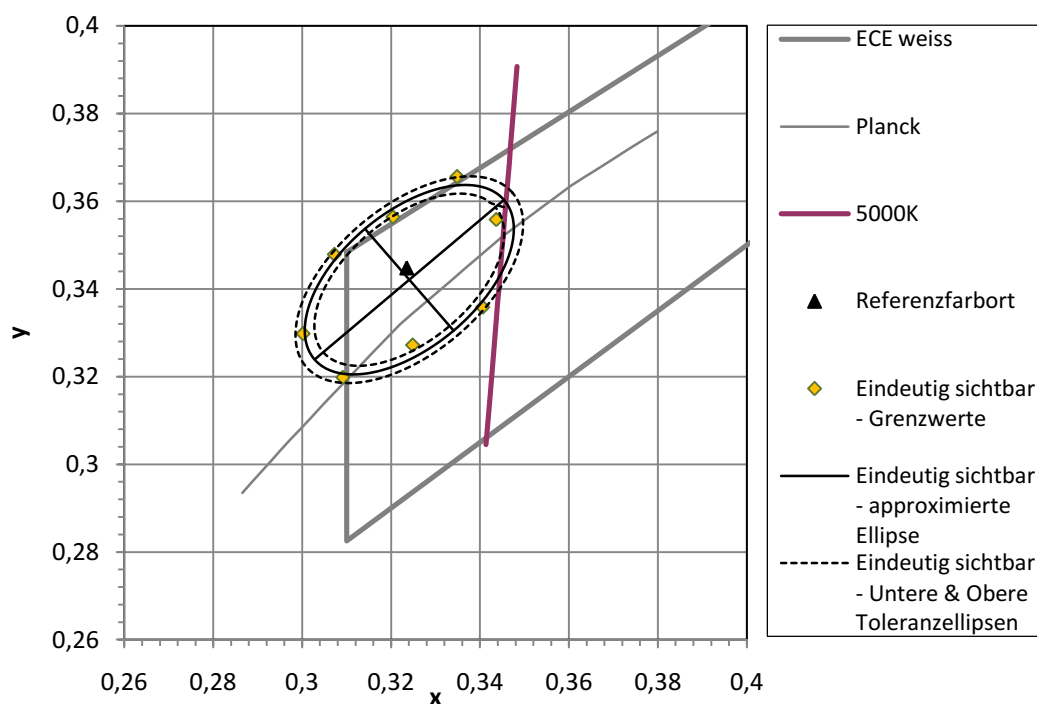


Abbildung C.26: Darstellung der Farbortgrenzwerte und der approximierten Ellipse von Teilversuch 7 in der CIE xy-Farbtabelle

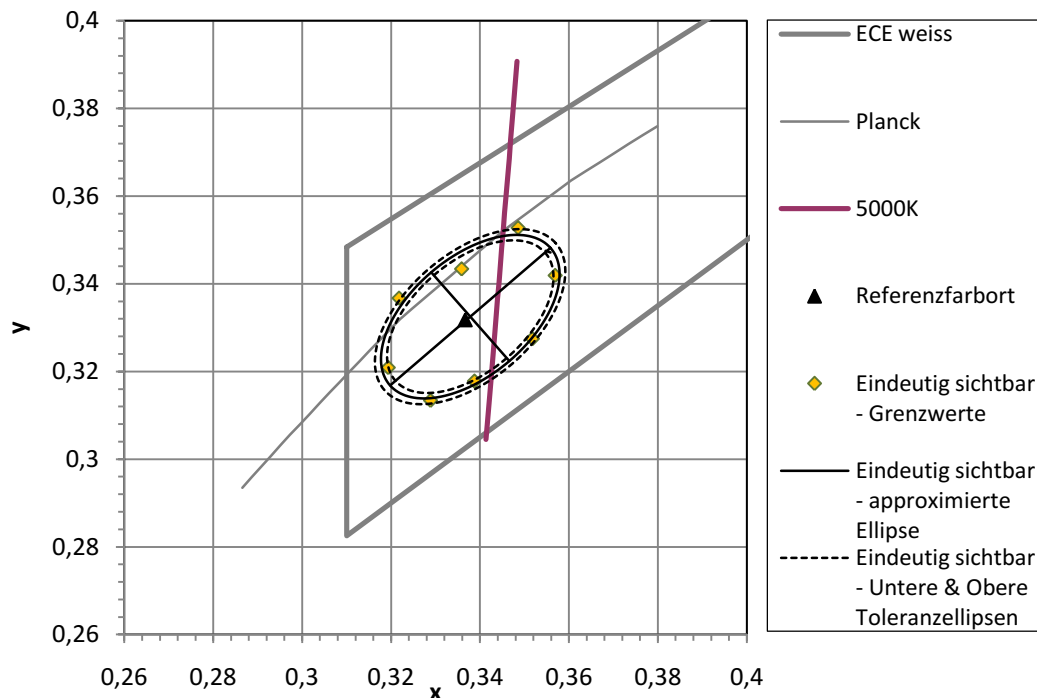


Abbildung C.27: Darstellung der Farbortgrenzwerte und der approximierten Ellipse von Teilversuch 8 in der CIE xy-Farbtabelle

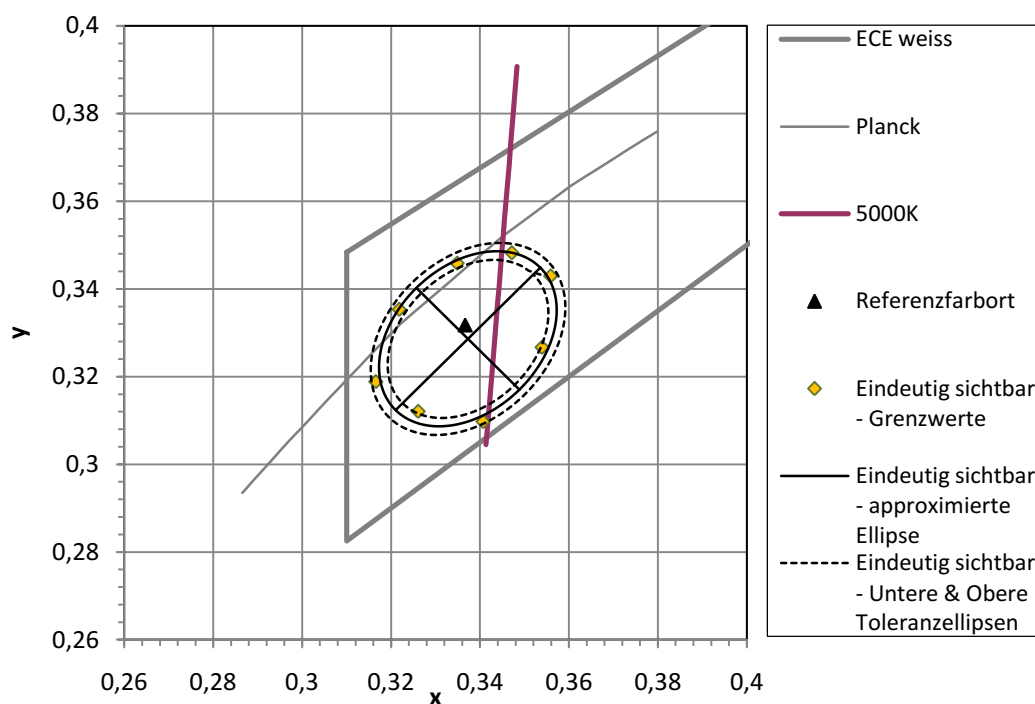


Abbildung C.28: Darstellung der Farbortgrenzwerte und der approximierten Ellipse von Teilversuch 9 in der CIE xy-Farbtabelle

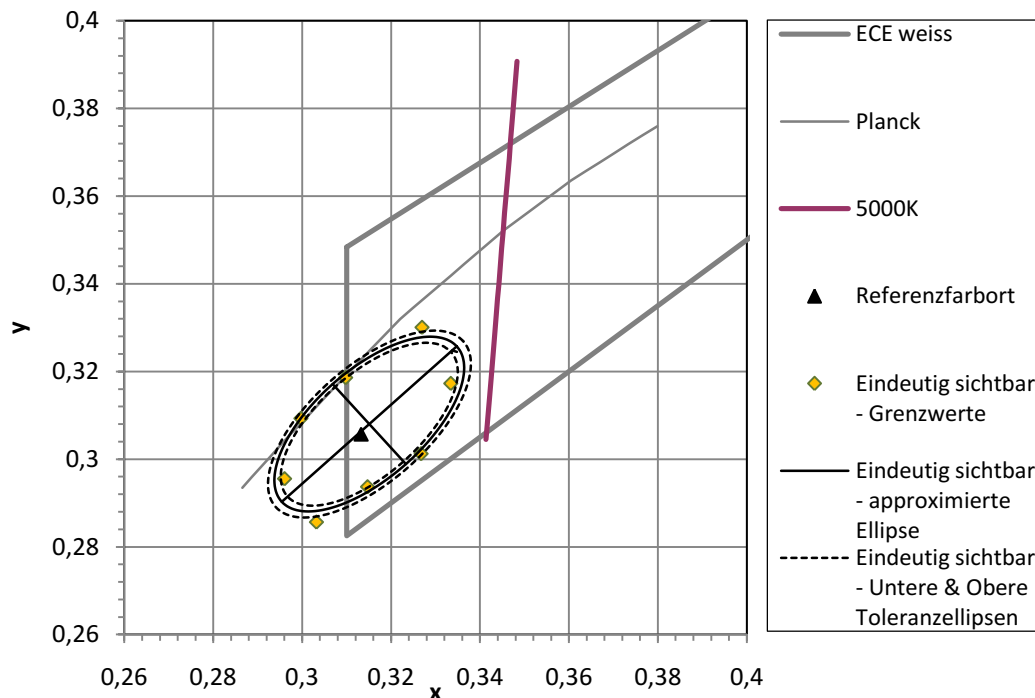


Abbildung C.29: Darstellung der Farbortgrenzwerte und der approximierten Ellipse von Teilversuch 10 in der CIE xy-Farbtabelle

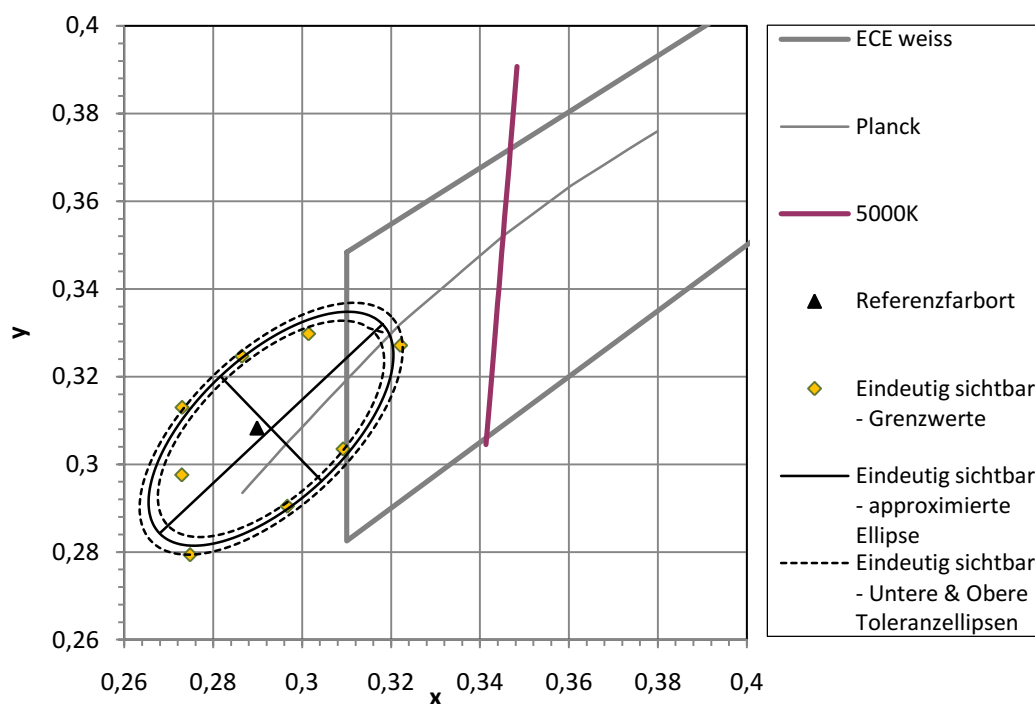


Abbildung C.30: Darstellung der Farbortgrenzwerte und der approximierten Ellipse von Teilversuch 11 in der CIE xy-Farbtafel

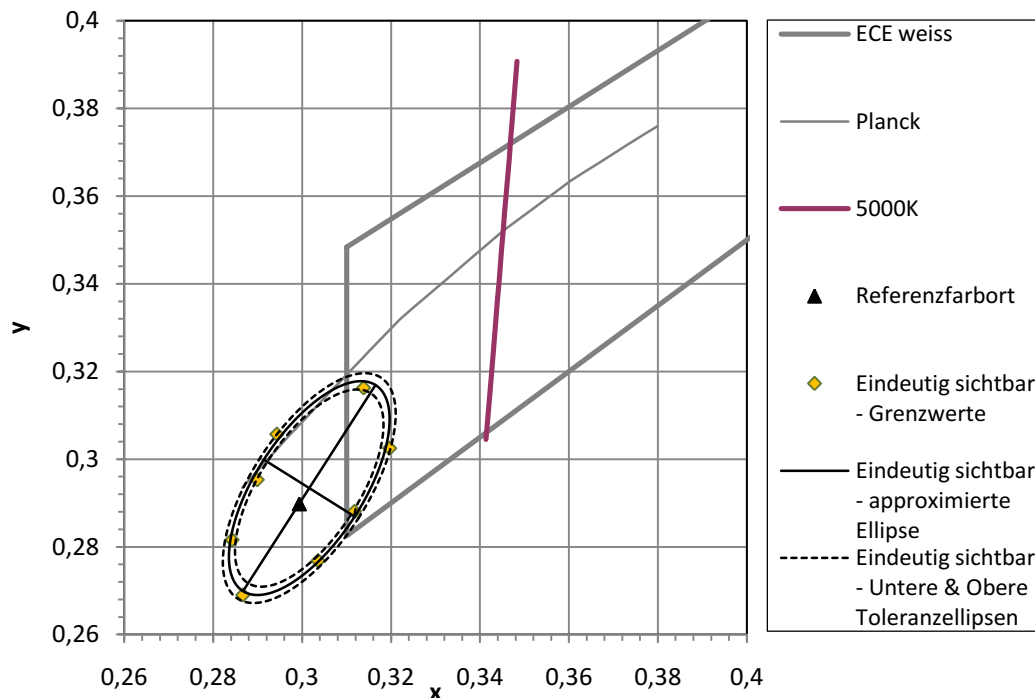


Abbildung C.31: Darstellung der Farbortgrenzwerte und der approximierten Ellipse von Teilversuch 12 in der CIE xy-Farbtafel

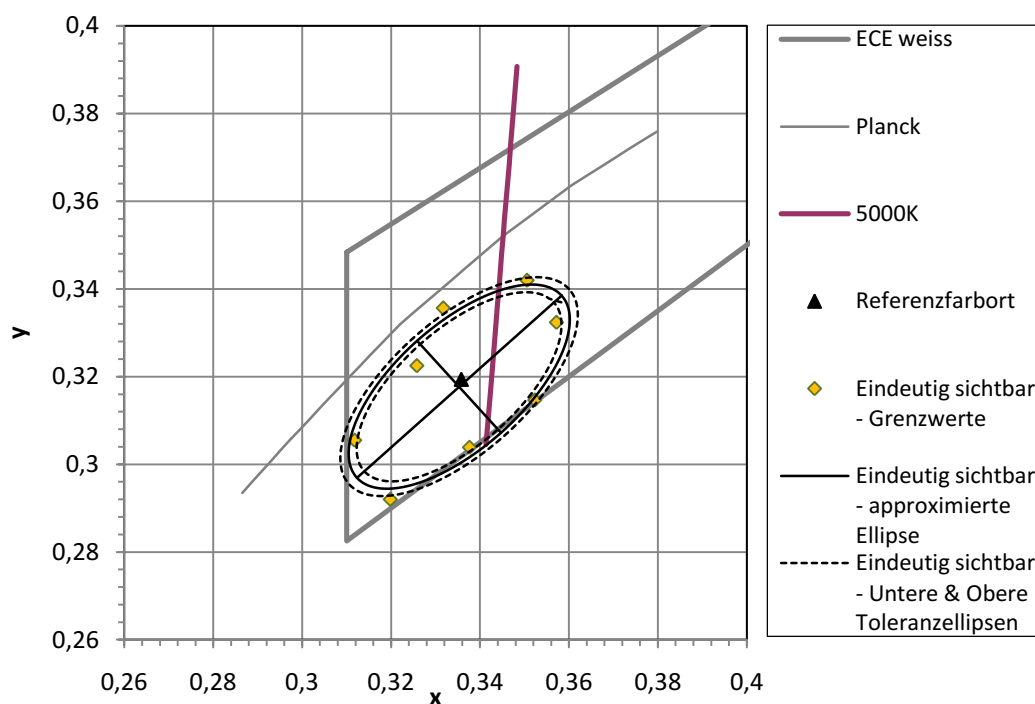


Abbildung C.32: Darstellung der Farbortgrenzwerte und der approximierten Ellipse von Teilversuch 13 in der CIE xy-Farbtafel

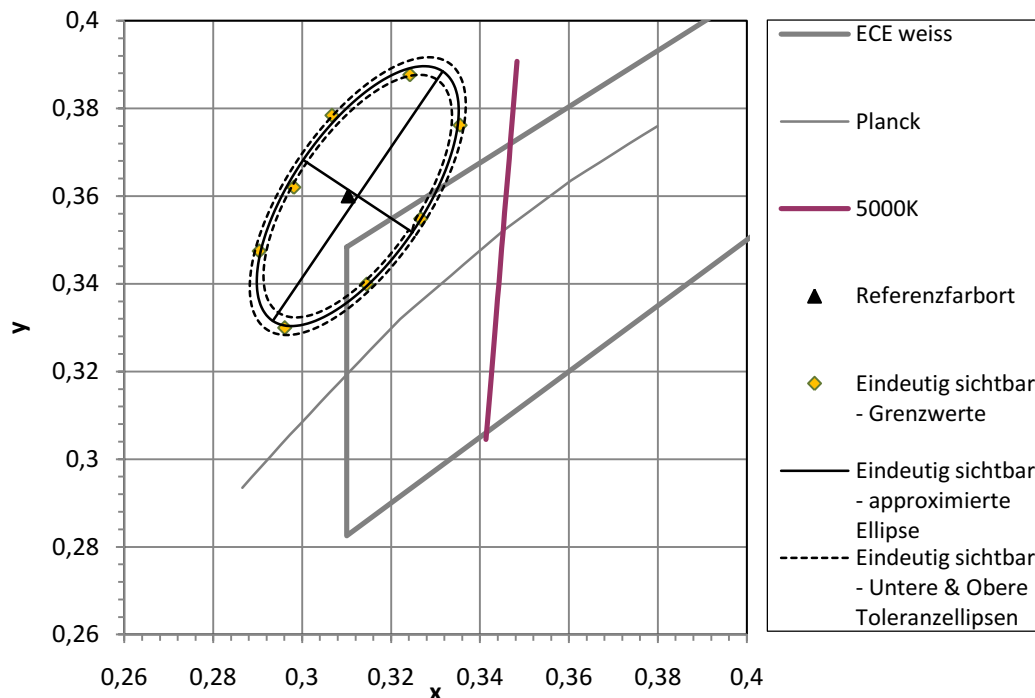


Abbildung C.33: Darstellung der Farbortgrenzwerte und der approximierten Ellipse von Teilversuch 14 in der CIE xy-Farbtafel

Anhang D – Anhang zu den Untersuchungen mit Scheinwerfern

D.1 Farborte Grenzmuster

Tabelle D.1: Farborte in der CIE xy-Farbtafel für die Grenzmuster des BMW 3er Scheinwerfers									
Typbezeichnung		HV		AL		H30		DL	
Innerer Ring (IR)	Akzent-leuchte (AL)	IR				IR			
LU	AL L	0,3304	0,3418	0,3409	0,3527	0,3262	0,3341	0,3273	0,3388
LO	AL L	0,3282	0,3414	0,3409	0,3527	0,3247	0,3350	0,3273	0,3388
RU	AL L	0,3355	0,3470	0,3409	0,3527	0,3319	0,3409	0,3273	0,3388
RO	AL L	0,3339	0,3486	0,3409	0,3527	0,3309	0,3427	0,3273	0,3388
LU	AL L	0,3304	0,3418	0,3409	0,3527	0,3262	0,3341	0,3273	0,3388
LU	AL R	0,3308	0,3424	0,3362	0,3443	0,3234	0,3294	0,3227	0,3292
LO	AL R	0,3289	0,3422	0,3362	0,3443	0,3218	0,3301	0,3227	0,3292
RU	AL R	0,3359	0,3472	0,3362	0,3443	0,3289	0,3346	0,3227	0,3292
RO	AL R	0,3351	0,3501	0,3362	0,3443	0,3276	0,3370	0,3227	0,3292

Typbezeichnung		HV		ÄR		H30		ÄR	
Innerer Ring (IR)	Äußerer Ring (ÄR)	IR				IR			
LU	LO	0,3304	0,3418	0,3289	0,3422	0,3262	0,3341	0,3218	0,3301
LU	RU	0,3304	0,3418	0,3359	0,3472	0,3262	0,3341	0,3289	0,3346
LU	RO	0,3304	0,3418	0,3351	0,3501	0,3262	0,3341	0,3276	0,3370

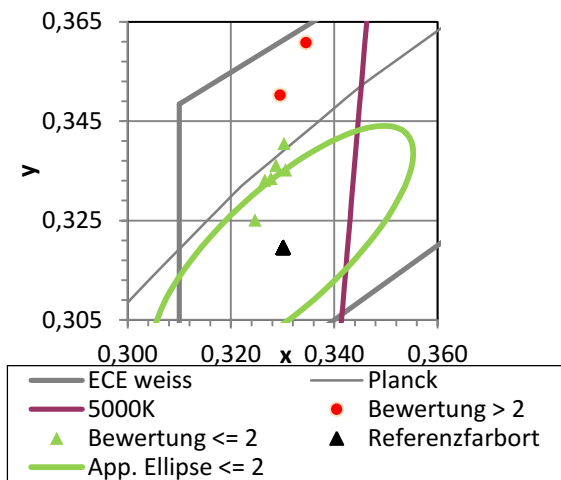
Tabelle D.2: Farborte in der CIE xy-Farbtabelle für die Grenzmuster des BMW 5er Scheinwerfers - Teil 1

Typbezeichnung		Nur LED			HV		H30						
Innerer Ring (IR)	Äußerer Ring (ÄR)	ÄR			IR	ÄR	IR	ÄR					
5E	2C	0,3290	0,3466	0,3237	0,3179	0,3301	0,3431	0,3247	0,3251	0,3331	0,3563	0,3289	0,3311
	3A	0,3290	0,3466	0,3200	0,3166	0,3301	0,3431	0,3266	0,3331	0,3331	0,3563	0,3246	0,3286
	3D	0,3290	0,3466	0,3227	0,3221	0,3301	0,3431	0,3303	0,3405	0,3331	0,3563	0,3271	0,3342
	4C	0,3290	0,3466	0,3204	0,3162	0,3301	0,3431	0,3287	0,3361	0,3331	0,3563	0,3262	0,3302
	5C	0,3290	0,3466	0,3235	0,3360	0,3301	0,3431	0,3295	0,3502	0,3331	0,3563	0,3245	0,3414
2C	5C	0,3237	0,3179	0,3235	0,3360	0,3286	0,3209	0,3295	0,3502	0,3301	0,3322	0,3245	0,3414
	3A	0,3237	0,3179	0,3200	0,3166	0,3286	0,3209	0,3266	0,3331	0,3301	0,3322	0,3246	0,3286
	3D	0,3237	0,3179	0,3227	0,3221	0,3286	0,3209	0,3303	0,3405	0,3301	0,3322	0,3271	0,3342
	4C	0,3237	0,3179	0,3204	0,3162	0,3286	0,3209	0,3287	0,3361	0,3301	0,3322	0,3262	0,3302
3C	5C	0,3226	0,3179	0,3235	0,3360	0,3284	0,3253	0,3295	0,3502	0,3305	0,3376	0,3245	0,3414
	5E	0,3226	0,3179	0,3290	0,3466	0,3284	0,3253	0,3345	0,3608	0,3305	0,3376	0,3307	0,3534
	1A	0,3226	0,3179	0,3280	0,3144	0,3284	0,3253	0,3281	0,3177	0,3305	0,3376	0,3306	0,3210
	2C	0,3226	0,3179	0,3237	0,3179	0,3284	0,3253	0,3247	0,3251	0,3305	0,3376	0,3289	0,3311
	2E	0,3226	0,3179	0,3201	0,3148	0,3284	0,3253	0,3277	0,3335	0,3305	0,3376	0,3250	0,3276
	3A	0,3226	0,3179	0,3200	0,3166	0,3284	0,3253	0,3266	0,3331	0,3305	0,3376	0,3246	0,3286
	3D	0,3226	0,3179	0,3227	0,3221	0,3284	0,3253	0,3303	0,3405	0,3305	0,3376	0,3271	0,3342
	4C	0,3226	0,3179	0,3204	0,3162	0,3284	0,3253	0,3287	0,3361	0,3305	0,3376	0,3262	0,3302

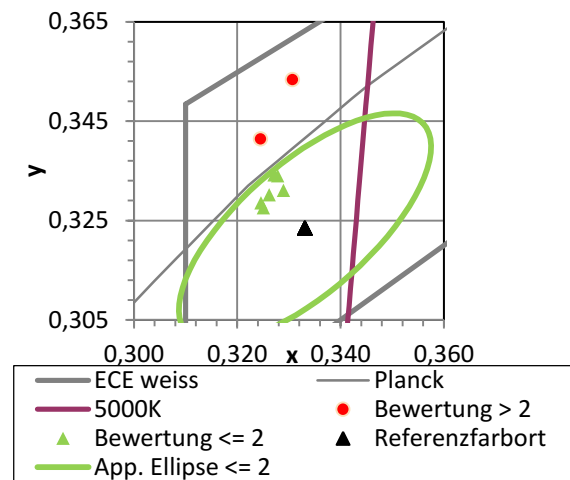
Tabelle D.3: Farborte in der CIE xy-Farbtabelle für die Grenzmuster des BMW 5er Scheinwerfers - Teil 2

Typbezeichnung			Nur LED		HV		H30						
Innerer Ring (IR)	Äußerer Ring (ÄR)		ÄR	IR	ÄR	IR	ÄR						
1A	5E	0,3280	0,3144	0,3290	0,3466	0,3301	0,3196	0,3345	0,3608	0,3331	0,3234	0,3307	0,3534
	5C	0,3280	0,3144	0,3235	0,3360	0,3301	0,3196	0,3295	0,3502	0,3331	0,3234	0,3245	0,3414
	4C	0,3280	0,3144	0,3204	0,3162	0,3301	0,3196	0,3287	0,3361	0,3331	0,3234	0,3262	0,3302
	3D	0,3280	0,3144	0,3227	0,3221	0,3301	0,3196	0,3303	0,3405	0,3331	0,3234	0,3271	0,3342
	3C	0,3280	0,3144	0,3226	0,3209	0,3301	0,3196	0,3306	0,3352	0,3331	0,3234	0,3278	0,3340
	3A	0,3280	0,3144	0,3200	0,3166	0,3301	0,3196	0,3266	0,3331	0,3331	0,3234	0,3246	0,3286
	2C	0,3280	0,3144	0,3237	0,3179	0,3301	0,3196	0,3247	0,3251	0,3331	0,3234	0,3289	0,3311
	2E	0,3280	0,3144	0,3201	0,3148	0,3301	0,3196	0,3277	0,3335	0,3331	0,3234	0,3250	0,3276
2E	5E	0,3201	0,3148	0,3290	0,3466	0,3232	0,3154	0,3345	0,3608	0,3272	0,3305	0,3307	0,3534
	5C	0,3201	0,3148	0,3235	0,3360	0,3232	0,3154	0,3295	0,3502	0,3272	0,3305	0,3245	0,3414
	3D	0,3201	0,3148	0,3227	0,3221	0,3232	0,3154	0,3303	0,3405	0,3272	0,3305	0,3271	0,3342
	2C	0,3201	0,3148	0,3237	0,3179	0,3232	0,3154	0,3247	0,3251	0,3272	0,3305	0,3289	0,3311
	3A	0,3201	0,3148	0,3200	0,3166	0,3232	0,3154	0,3266	0,3331	0,3272	0,3305	0,3246	0,3286
	4C	0,3201	0,3148	0,3204	0,3162	0,3232	0,3154	0,3287	0,3361	0,3272	0,3305	0,3262	0,3302

D.2 Darstellung der Probandenergebnisse

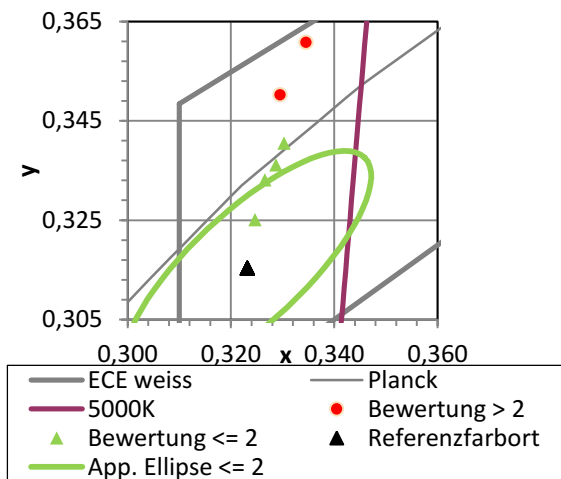


(a) Farborte des Positionslichts des BMW 5er Scheinwerfers in HV

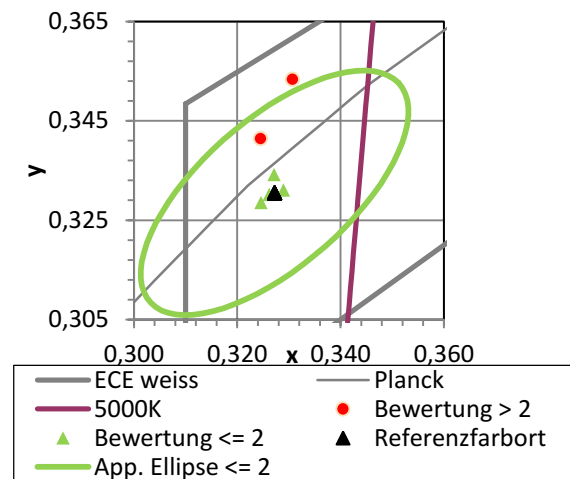


(b) Farborte des Positionslichts des BMW 5er Scheinwerfers $H=30^\circ$

Abbildung D.1: Darstellung der Probandenergebnisse aus Versuch 1 mit IR = 1A

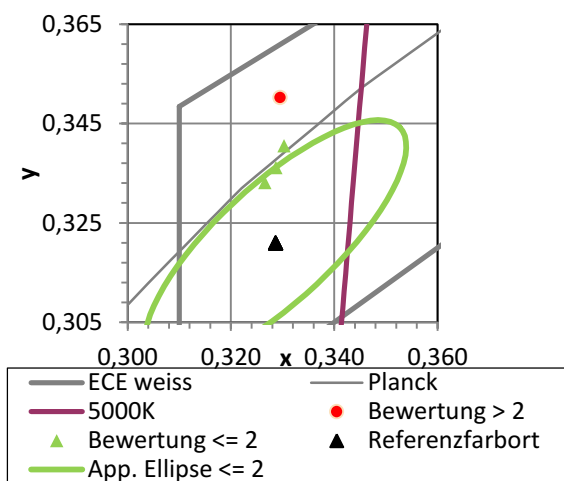


(a) Farborte des Positionslichts des BMW 5er Scheinwerfers in HV

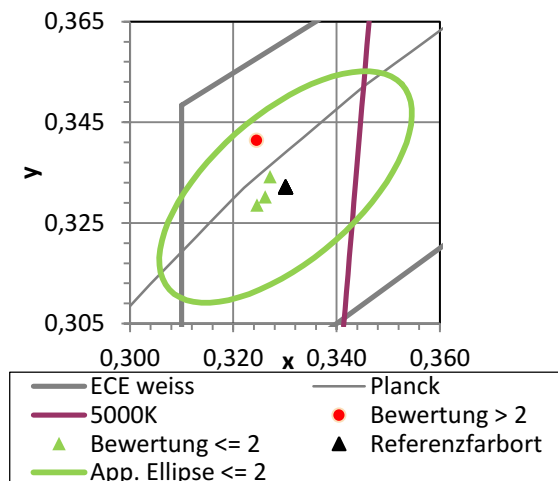


(b) Farborte des Positionslichts des BMW 5er Scheinwerfers $H=30^\circ$

Abbildung D.2: Darstellung der Probandenergebnisse aus Versuch 1 mit IR = 2E

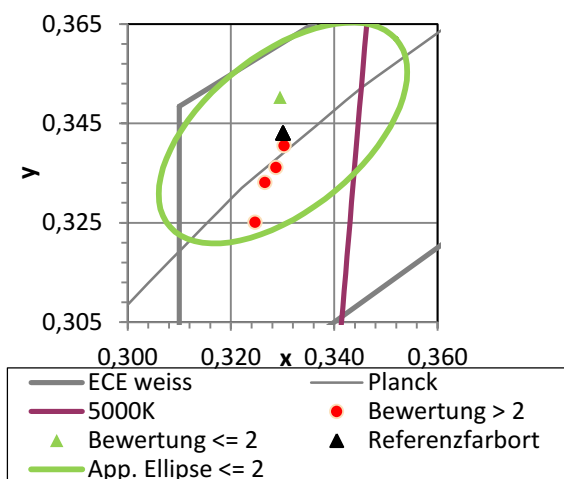


(a) Farborte des Positionslichts des BMW 5er Scheinwerfers in HV

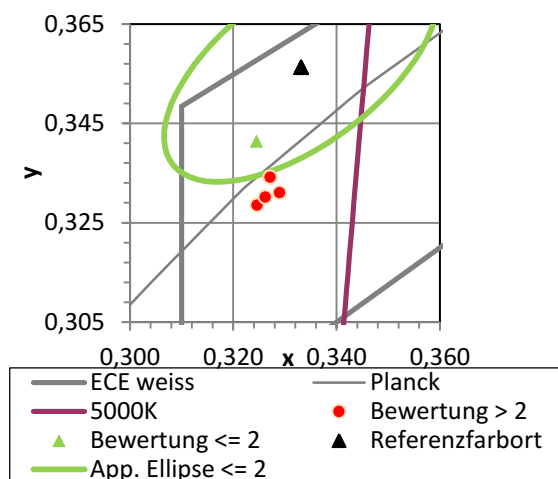


(b) Farborte des Positionslichts des BMW 5er Scheinwerfers H=30°

Abbildung D.3: Darstellung der Probandenergebnisse aus Versuch 1 mit IR = 2C

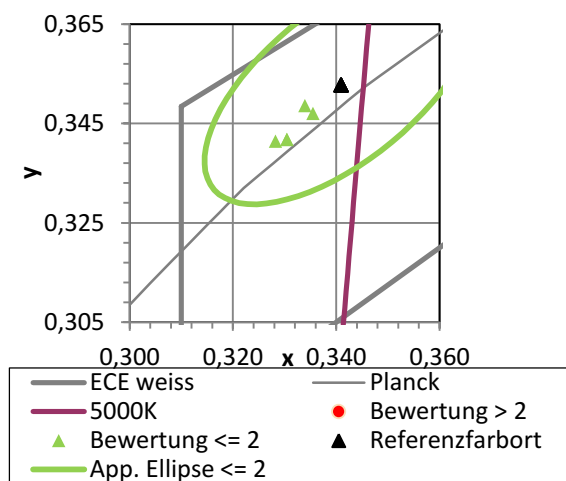


(a) Farborte des Positionslichts des BMW 5er Scheinwerfers in HV

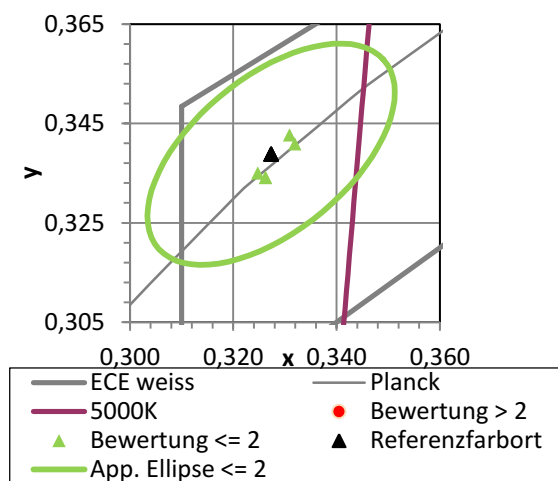


(b) Farborte des Positionslichts des BMW 5er Scheinwerfers H=30°

Abbildung D.4: Darstellung der Probandenergebnisse aus Versuch 1 mit IR = 5E

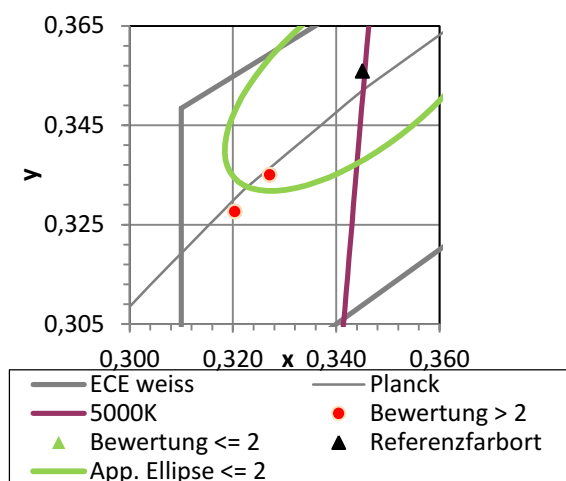


(a) Farborte des Positionslichts des BMW 3er Scheinwerfers AL = LI in HV

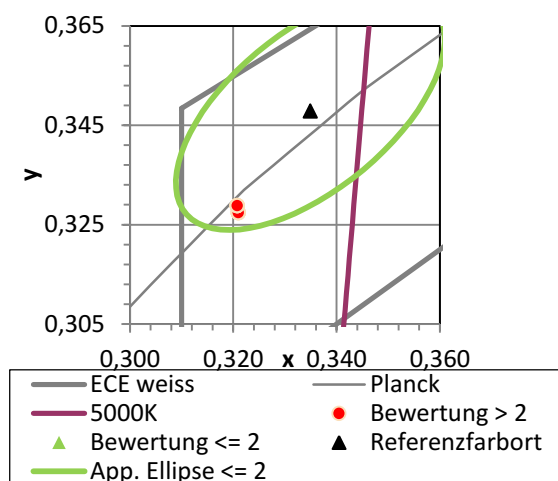


(b) Farborte des Positionslichts des BMW 3er Scheinwerfers AL = LI in H=30°

Abbildung D.5: Darstellung der Probandenergebnisse aus Teilversuch 2 - Referenzfarbort des äußeren Rings LI)



(a) Farborte des Positionslichts des BMW 7er Scheinwerfers M2 in HV



(b) Farborte des Positionslichts des BMW 7er Scheinwerfers M2 H=30°

Abbildung D.6: Darstellung der Probandenergebnisse aus Teilversuch 3 - Referenzfarbort des Scheinwerfers = M2)

Anhang E – Anhang zu den Untersuchungen am Warmerscheinungsbildsimulator

E.1 Photometrische Stabilität des Warmerscheinungsbildsimulators

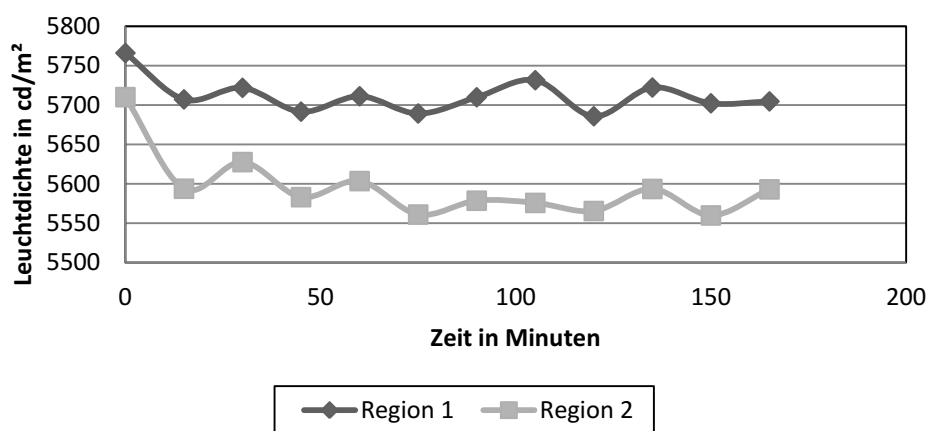


Abbildung E.1: Leuchtdichtestabilität des WESs

E.2 Inhomogenitätsmuster

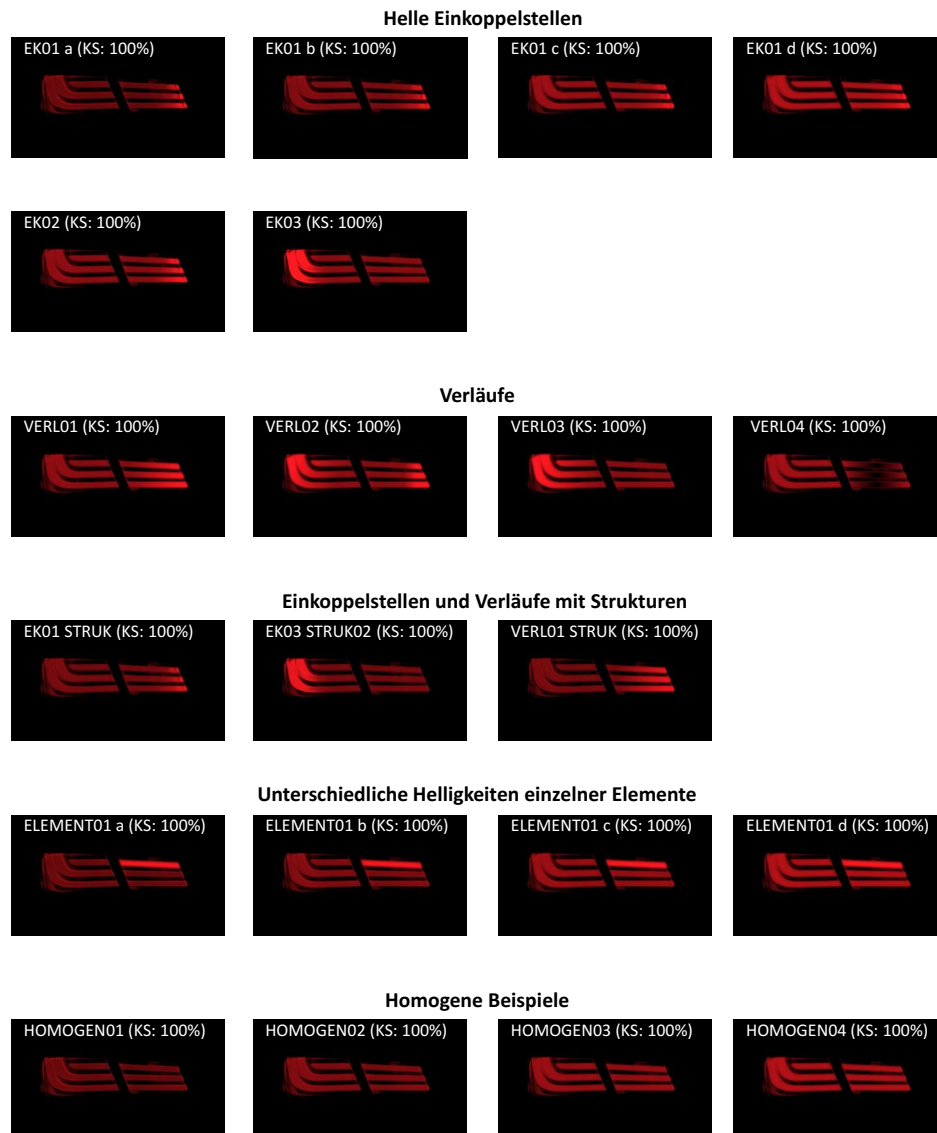


Abbildung E.2: Darstellung der Inhomogenitätsmuster aus den WES Versuchen (KS = 100 %)

E.3 Ergebnisse der Signifikanzanalyse

Die Bewertung der Signifikanz der Parametervariation Inhomogenitätsklassen mit und ohne überlagerte Strukturen erfolgt mit Hilfe eines zweiseitigen t-Tests für zwei Stichproben mit einer Probandenanzahl $n = 31$, $m = 31$ und einem Signifikanzniveau $\alpha = 0,05$ gemäß Gleichung E.2.

Die Fragestellung lautet: Unterscheiden sich die Bewertungen einer unstrukturierten Inhomogenitätsklasse signifikant von den Bewertungen einer strukturierten Inhomogenitätsklasse?

Nullhypothese: $H_0: \bar{X}_{oS} = \bar{X}_{mS}$

Alternativhypothese: $H_1: \bar{X}_{oS} \neq \bar{X}_{mS}$

Die Bestimmung der Gesamtvarianz σ_{Gesamt} erfolgt analog zu Gleichung E.1

$$\sigma_{\text{Gesamt}} = \frac{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}{2} \quad (\text{E.1})$$

Um den erwarteten t-Wert t_{exp} zu berechnen, werden als Eingangsgrößen die Mittelwerte \bar{X}_{oS} und \bar{X}_{mS} , die Standardabweichungen σ_1 , σ_2 der jeweiligen Versuche und die berechnete Gesamtvarianz σ_{Gesamt} verwendet.

$$t_{\text{exp}} = \left| \sqrt{\frac{n}{2}} \cdot \frac{\bar{X}_{oS} - \bar{X}_{mS}}{\sigma_{\text{Gesamt}}} \right| \quad (\text{E.2})$$

Die Nullhypothese muss immer verworfen werden, wenn der erwartete t-Wert t_{exp} größer ist als der tabellarische t-Wert t_{tab} . Für den zweiseitigen Test $t_{\text{tab}} = t_{2;60;0,05}$ ergibt sich aus der t-Testtabelle ein Wert von 2,00 [92].

Die Bewertung der Auswirkung der Parametervariationen erfolgt durch Cohens Effektstärke d gemäß Gleichung E.3 [18].

$$d = \left| \frac{\bar{X}_{oS} - \bar{X}_{mS}}{\sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 / 2}} \right| \quad (\text{E.3})$$

Laut Cohen [18] weist $d=0,20$ auf einen kleinen Effekt, $d=0,5$ auf einen mittleren und $d=0,8$ auf einen starken Effekt hin.

Das Ergebnisse der Signifikanz- und Effektstärkenanalyse ist in Tabelle E.1 aufgelistet. In Tabelle F.1 wird die Signifikanz und Effektstärke in Bezug auf die Inhomogenitätsklasse VERL01 und EK03 in Abhängigkeit mit einer überlagerten Struktur dargestellt. Es zeigt sich, dass die Probandenbewertungen für die Inhomogenitätsklasse VERL01 bei fünf von zehn Helligkeitsstufen signifikant durch die überlagerte Struktur beeinflusst werden. Bei keiner der bewerteten

Beispiele tritt auf Grund der veränderten Bedingungen ein starker Effekt auf (siehe Tabelle F.2). Bei der Inhomogenitätsklasse EK03 werden acht von zehn Darbietungsbeispiele wegen der Struktur signifikant anders beurteilt. Bei drei Helligkeitsstufen der Inhomogenitätsklasse EK03 ist der Effekt wie in Cohens Definition stark.

Tabelle E.1: Signifikanz- und Effektstärkenanalyse: Parametervariation - Strukturüberlagerung

Helligkeitsstufe	Verl01		EK03	
	t_{exp}	d	t_{exp}	d
10%	0,94	0,12	5,57	0,91
20%	4,35	0,65	4,27	0,65
25%	2,37	0,39	3,45	0,56
30%	2,48	0,38	2,52	0,43
35%	1,43	0,24	5,28	0,91
40%	0,39	0,08	2,33	0,37
50%	1,28	0,23	4,53	0,75
60%	3,88	0,71	5,37	0,81
80%	0,64	0,10	0,65	0,10
100%	2,18	0,38	1,08	0,18

Somit wirkt sich die überlagerte Struktur signifikant auf die Probandenbewertung der Darbietungsbeispiele aus.

E.4 Ergebnisse der Korrelationsanalyse

E.4.1 Darstellung der Korrelationsanalyseergebnisse unter Einbezug aller lokaler Inhomogenitäten

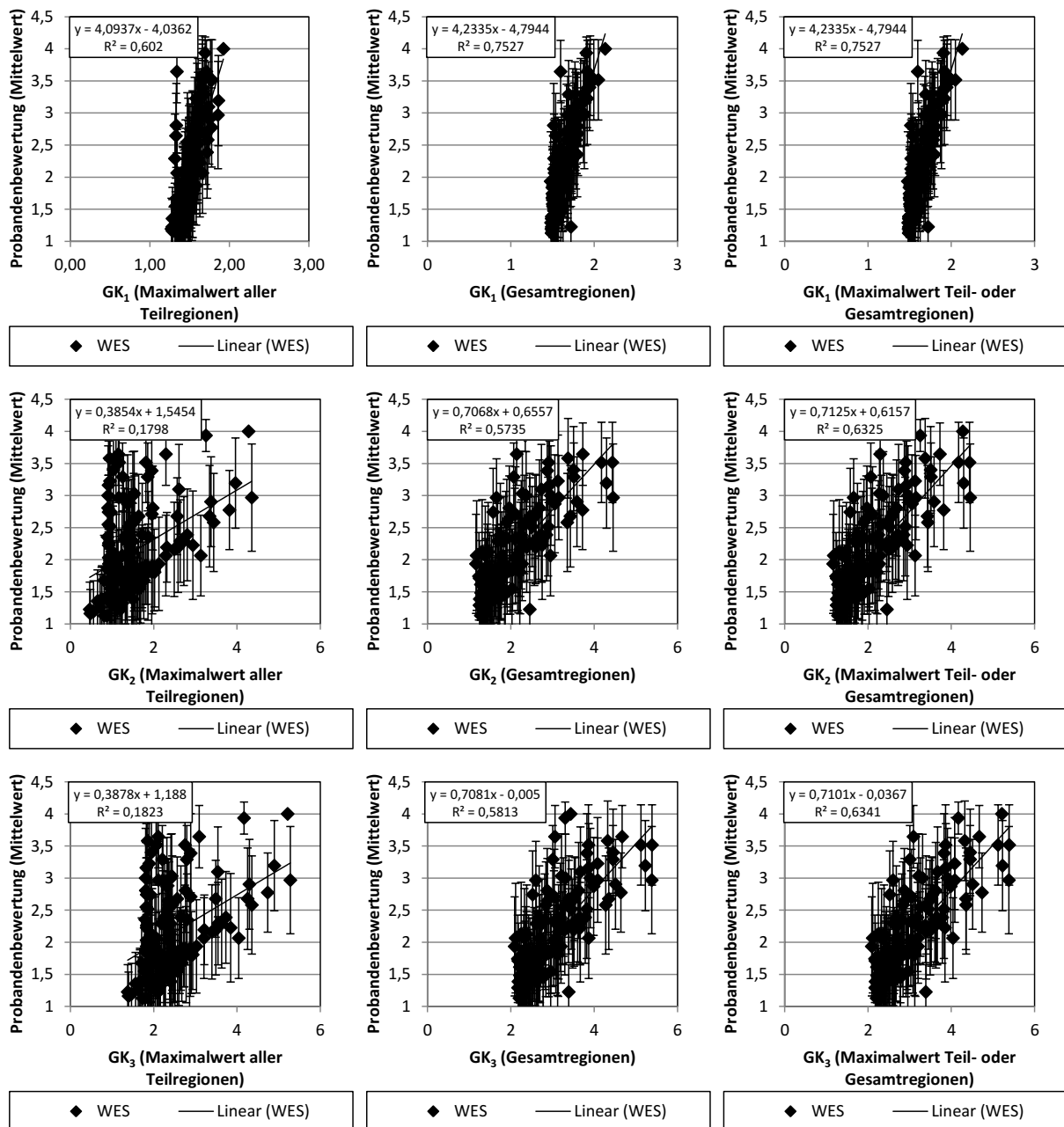


Abbildung E.3: Korrelationsanalyse WES: Alle Inhomogenitätsklassen außer Element01a - d - Teil 1

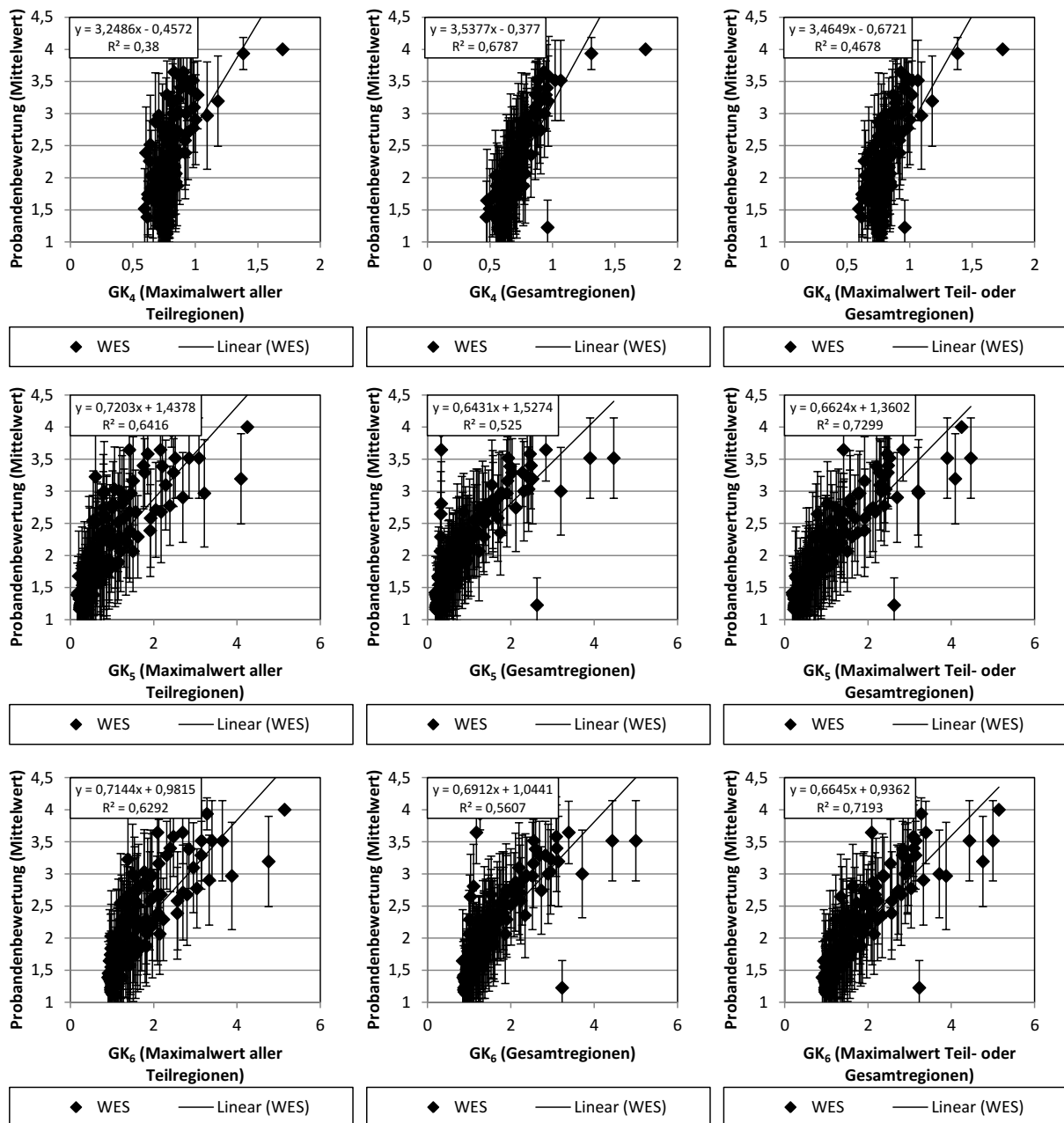


Abbildung E.4: Korrelationsanalyse WES: Alle Inhomogenitätsklassen außer Element01a - d - Teil 2

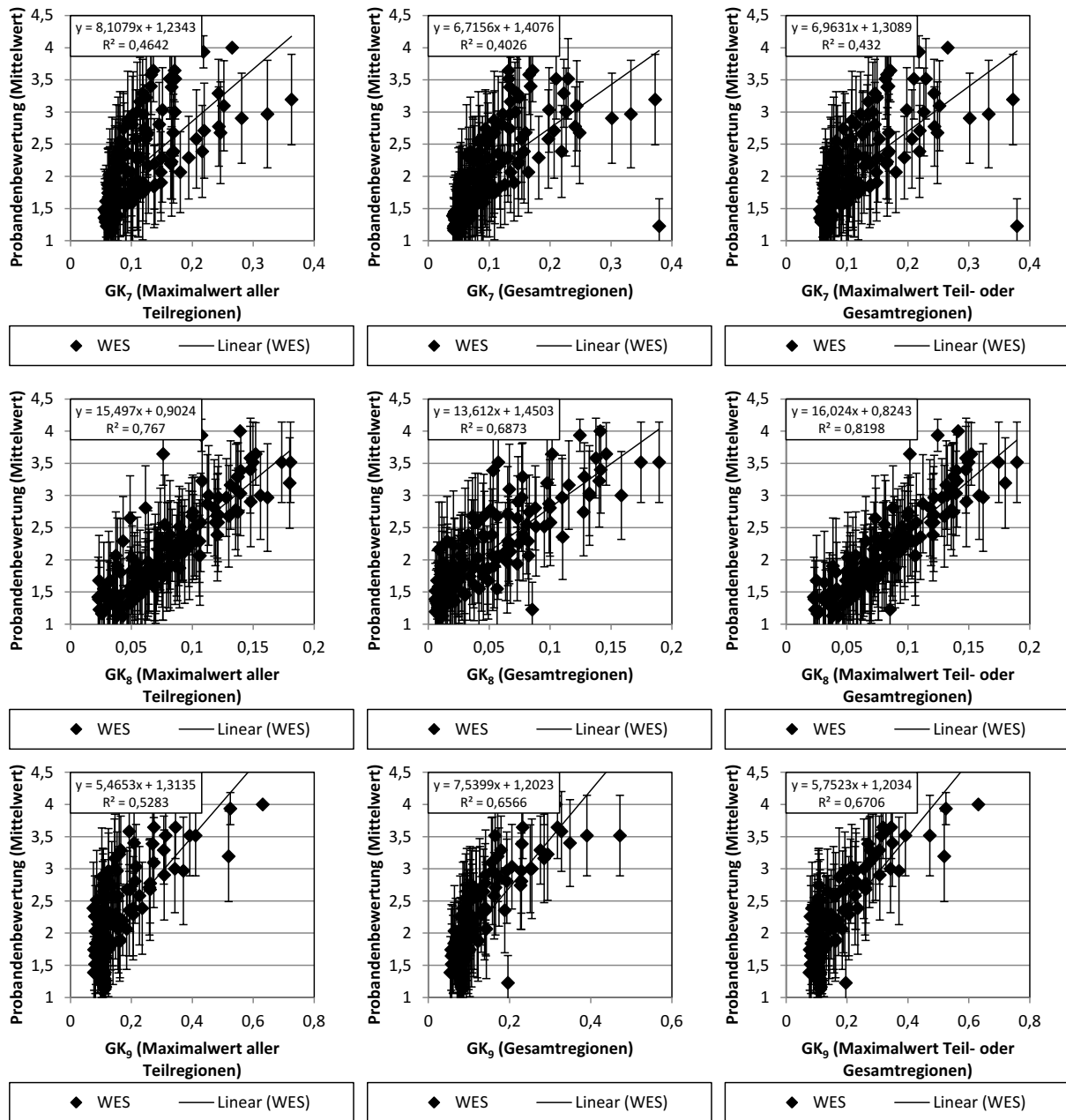


Abbildung E.5: Korrelationsanalyse WES: Alle Inhomogenitätsklassen außer Element01a - d - Teil 3

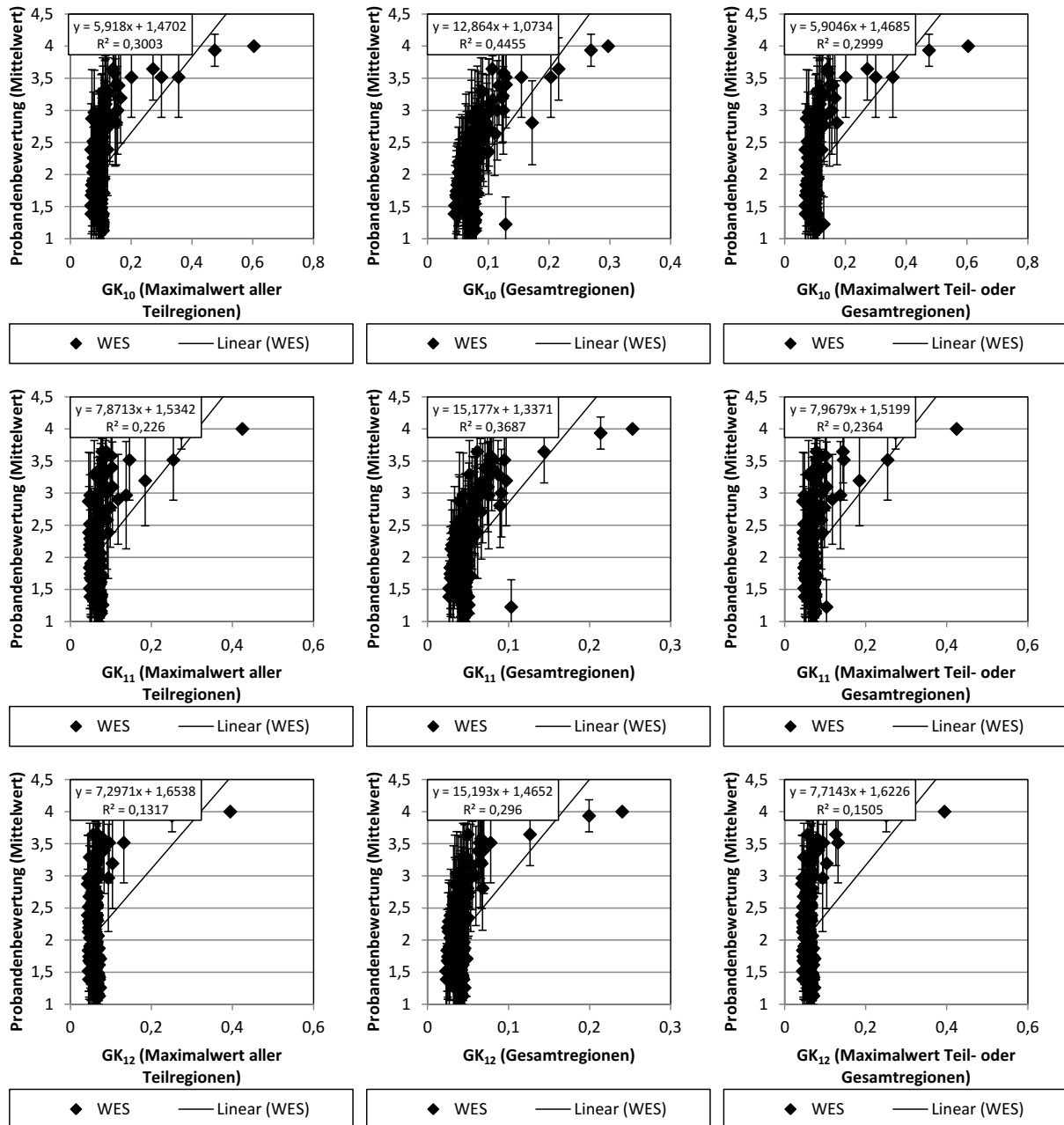


Abbildung E.6: Korrelationsanalyse WES: Alle Inhomogenitätsklassen außer Element01a - d - Teil 4

E.4.2 Auswertung des Bestimmtheitsmaßes nach den lokalen Inhomogenitäten

Tabelle E.2: Bestimmtheitsmaß: Separate Untersuchung der lokalen Inhomogenität über alle Gütekriterien - „lokale“ Auswertung

	EK01 a	EK01 b	EK01 c	EK01 d	EK02	EK03	EK01 STRUK	EK03 STRUK	Verl01	Verl02	Verl03	Verl04	Verl01 STRUK
GK ₁	0,90	0,90	0,79	0,47	0,82	0,97	0,95	0,91	0,96	0,98	0,87	0,21	0,88
GK ₂	0,83	0,79	0,65	0,39	0,72	0,18	0,97	0,89	0,44	0,94	0,11	0,00	0,02
GK ₃	0,83	0,80	0,66	0,39	0,73	0,13	0,97	0,86	0,59	0,94	0,02	0,01	0,04
GK ₄	0,88	0,78	0,68	0,39	0,92	0,58	0,98	0,77	0,56	0,92	0,89	0,15	0,94
GK ₅	0,92	0,90	0,85	0,76	0,98	0,98	0,96	0,84	0,95	0,95	0,66	0,25	0,97
GK ₆	0,92	0,90	0,90	0,81	0,97	0,97	0,97	0,84	0,94	0,95	0,79	0,20	0,97
GK ₇	0,92	0,89	0,87	0,90	0,95	0,94	0,97	0,85	0,91	0,91	0,90	0,33	0,94
GK ₈	0,91	0,89	0,85	0,71	0,92	0,98	0,95	0,92	0,92	0,95	0,84	0,16	0,97
GK ₉	0,87	0,90	0,84	0,64	0,97	0,72	0,97	0,70	0,70	0,83	0,67	0,46	0,75
GK ₁₀	0,93	0,54	0,34	0,52	0,88	0,65	0,93	0,47	0,46	0,67	0,69	0,81	0,70
GK ₁₁	0,86	0,60	0,00	0,01	0,59	0,56	0,67	0,35	0,09	0,60	0,73	0,18	0,77
GK ₁₂	0,66	0,12	0,01	0,01	0,01	0,31	0,20	0,34	0,09	0,71	0,81	0,27	0,69

Tabelle E.3: Bestimmtheitsmaß: Separate Untersuchung der lokalen Inhomogenität über alle Gütekriterien - „globale“ Auswertung

	EK01 a	EK01 b	EK01 c	EK01 d	EK02	EK03	EK01 STRUK	EK03 STRUK	Verl01	Verl02	Verl03	Verl04	Verl01 STRUK
GK ₁	0,90	0,90	0,84	0,01	0,92	0,96	0,95	0,91	0,85	0,98	0,93	0,61	0,90
GK ₂	0,88	0,84	0,60	0,59	0,87	0,95	0,92	0,88	0,41	0,96	0,90	0,93	0,69
GK ₃	0,88	0,84	0,62	0,57	0,87	0,95	0,92	0,89	0,44	0,97	0,90	0,92	0,70
GK ₄	0,93	0,94	0,93	0,74	0,93	0,98	0,98	0,91	0,93	0,96	0,89	0,75	0,97
GK ₅	0,89	0,90	0,88	0,82	0,98	0,96	0,96	0,80	0,90	0,94	0,88	0,60	0,93
GK ₆	0,89	0,90	0,89	0,81	0,98	0,95	0,96	0,80	0,90	0,95	0,88	0,94	0,93
GK ₇	0,92	0,88	0,84	0,75	0,95	0,95	0,97	0,87	0,94	0,93	0,88	0,93	0,97
GK ₈	0,90	0,90	0,89	0,76	0,96	0,97	0,96	0,90	0,92	0,96	0,89	0,94	0,97
GK ₉	0,92	0,89	0,87	0,88	0,95	0,83	0,98	0,87	0,82	0,73	0,71	0,95	0,93
GK ₁₀	0,90	0,80	0,91	0,62	0,96	0,92	0,89	0,61	0,89	0,94	0,86	0,93	0,74
GK ₁₁	0,89	0,81	0,59	0,31	0,85	0,86	0,86	0,69	0,75	0,93	0,88	0,84	0,73
GK ₁₂	0,76	0,57	0,39	0,22	0,39	0,81	0,68	0,67	0,71	0,91	0,88	0,81	0,86

Tabelle E.4: Bestimmtheitsmaß: Separate Untersuchung der lokalen Inhomogenität über alle Gütekriterien - „lokal oder globale“ Auswertung

	EK01 a	EK01 b	EK01 c	EK01 d	EK02	EK03	EK01 STRUK	EK03 STRUK	Verl01	Verl02	Verl03	Verl04	Verl01 STRUK
GK ₁	0,90	0,90	0,84	0,01	0,92	0,96	0,95	0,91	0,85	0,98	0,93	0,61	0,90
GK ₂	0,88	0,84	0,62	0,59	0,87	0,95	0,93	0,88	0,41	0,96	0,90	0,72	0,71
GK ₃	0,88	0,84	0,64	0,57	0,88	0,95	0,93	0,89	0,44	0,97	0,90	0,69	0,72
GK ₄	0,88	0,78	0,68	0,39	0,92	0,78	0,98	0,88	0,63	0,92	0,88	0,62	0,93
GK ₅	0,92	0,90	0,85	0,76	0,98	0,96	0,96	0,80	0,90	0,95	0,88	0,72	0,93
GK ₆	0,92	0,90	0,90	0,81	0,97	0,95	0,97	0,80	0,90	0,94	0,88	0,72	0,93
GK ₇	0,91	0,89	0,87	0,90	0,95	0,92	0,97	0,85	0,92	0,91	0,85	0,92	0,95
GK ₈	0,91	0,89	0,85	0,71	0,92	0,98	0,95	0,91	0,92	0,95	0,89	0,94	0,97
GK ₉	0,87	0,90	0,84	0,64	0,97	0,79	0,97	0,86	0,73	0,83	0,65	0,83	0,78
GK ₁₀	0,93	0,54	0,34	0,52	0,88	0,65	0,93	0,47	0,46	0,67	0,67	0,77	0,70
GK ₁₁	0,86	0,60	0,00	0,01	0,60	0,56	0,67	0,35	0,09	0,60	0,73	0,65	0,75
GK ₁₂	0,66	0,12	0,01	0,01	0,01	0,31	0,20	0,34	0,09	0,71	0,81	0,62	0,69

Anhang F – Anhang zu den Validierungsuntersuchungen mit Heckleuchten

F.1 Bewertung der photometrischen Systemeigenschaften

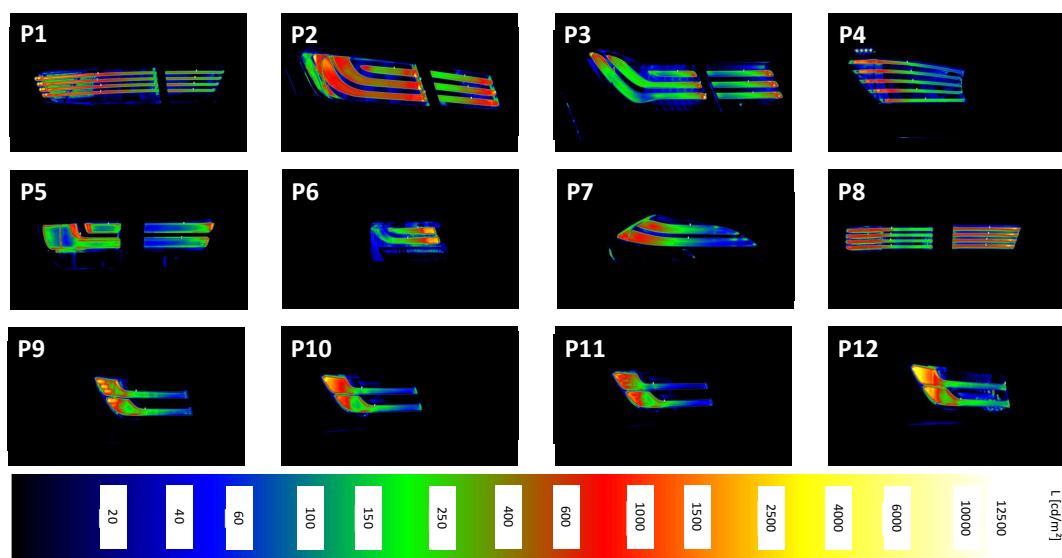


Abbildung F.1: Leuchtdichteaufnahmen der verwendeten Heckleuchten aus der H30-Richtung bei dunklen Umgebungsbedingungen

F.2 Ergebnisse der Signifikanzanalyse

Die Bewertung der Signifikanz der Parametervariationen dunkle und helle Umgebungsbedingung sowie senkrechte und seitliche Beobachtungsposition erfolgt mit Hilfe eines zweiseitigen t-Tests für zwei Stichproben mit einer Probandenanzahl $n = 46$, $m = 46$ und einem Signifikanzniveau $\alpha = 0,05$ gemäß Gleichungen (E.1) und (E.2).

Die erste Fragestellung lautet: Unterscheiden sich die Bewertungen in einer dunklen Umgebung signifikant gegenüber den Bewertungen in einer hellen Umgebung?

Nullhypothese: $H_0: \bar{X}_D = \bar{X}_H$

Alternativhypothese: $H_1: \bar{X}_D \neq \bar{X}_H$

Die zweite Fragestellung lautet: Unterscheiden sich die Bewertungen in senkrechter Beobachtungsrichtung (HV) signifikant gegenüber einer seitlichen Beobachtungsrichtung (H30)?

Nullhypothese: $H_0: \bar{X}_{HV} = \bar{X}_{H30}$

Alternativhypothese: $H_1: \bar{X}_{HV} \neq \bar{X}_{H30}$

Die Nullhypothese muss immer verworfen werden, wenn der erwartete t-Wert t_{exp} größer ist als der tabellarische t-Wert t_{tab} . Für den zweiseitigen Test $t_{\text{tab}} = t_{2;90;0,05}$ ergibt sich aus der t-Testtabelle ein Wert von 1,9867 [92].

Die Ergebnisse der Signifikanz- und Effektstärkenanalyse sind in den Tabellen F.1 und F.2 dargestellt. In Tabelle F.1 wird die Signifikanz und Effektstärke in Abhängigkeit der Umgebungsleuchtdichte separat für die Beobachtungsrichtungen HV und H30 dargestellt. Es zeigt sich, dass die Probandenbewertungen in HV Richtung bei neun von zwölf Leuchten und in H30 Richtung bei zwei von zwölf Leuchten signifikant auf Grund der Umgebungsleuchte beeinflusst werden. Bei keiner der bewerteten Leuchten tritt auf Grund der veränderten Umgebungsbedingungen ein starker Effekt auf (siehe Tabelle F.2).

Tabelle F.1: Signifikanz- und Effektstärkenanalyse: Parametervariation - Umgebungshelligkeit
 $L_u \approx 0,01 \text{ cd/m}^2$ / $L_u \approx 3 \text{ cd/m}^2$

	HV		H30	
	t_{exp}	d	t_{exp}	d
P1	3,66	0,52	0,86	0,12
P2	3,85	0,63	1,87	0,31
P3	2,34	0,40	2,15	0,37
P4	5,39	0,64	0,56	0,09
P5	2,96	0,42	1,75	0,32
P6	1,72	0,28	2,56	0,34
P7	5,59	0,66	1,28	0,15
P8	2,62	0,33	1,08	0,14
P9	2,89	0,44	1,69	0,28
P10	3,40	0,50	0,97	0,13
P11	1,02	0,18	1,48	0,23
P12	0,37	0,06	1,37	0,18

In Tabelle F.2 wird die Signifikanz und Effektstärke in Abhängigkeit der Beobachtungsrichtung separat für die dunkle und die helle Umgebungsleuchtdichte dargestellt. Es zeigt sich, dass die Probandenbewertungen bei dunklen Umgebungsbedingungen bei acht von zwölf Leuchten und bei hellen Umgebungsbedingungen bei neun von zwölf Leuchten signifikant auf Grund

Tabelle F.2: Signifikanz- und Effektstärkenanalyse: Parametervariation - Beobachtungsrichtung HV / H30

	Dunkel		Hell	
	t_{exp}	d	t_{exp}	d
P1	1,83	0,27	2,66	0,36
P2	5,19	0,92	4,87	0,73
P3	0,00	0,00	0,17	0,03
P4	3,09	0,47	8,88	1,10
P5	8,14	1,37	4,49	0,71
P6	3,15	0,46	3,02	0,45
P7	3,84	0,49	2,77	0,30
P8	2,78	0,37	5,03	0,60
P9	2,48	0,41	1,98	0,30
P10	2,40	0,38	2,06	0,26
P11	0,29	0,05	2,47	0,38
P12	0,44	0,06	0,23	0,03

der Beobachtungsrichtung beeinflusst werden. Bei den Leuchten P2, P4 und P5 ist der Effekt gemäß Cohens Definition stark.

Somit wirkt sich sowohl die Beobachtungsrichtung als auch die Umgebungshelligkeit signifikant auf die Probandenbewertung der Leuchten aus.

F.3 Ergebnisse der Korrelationsanalyse

F.3.1 Auswertung des Bestimmtheitsmaßes

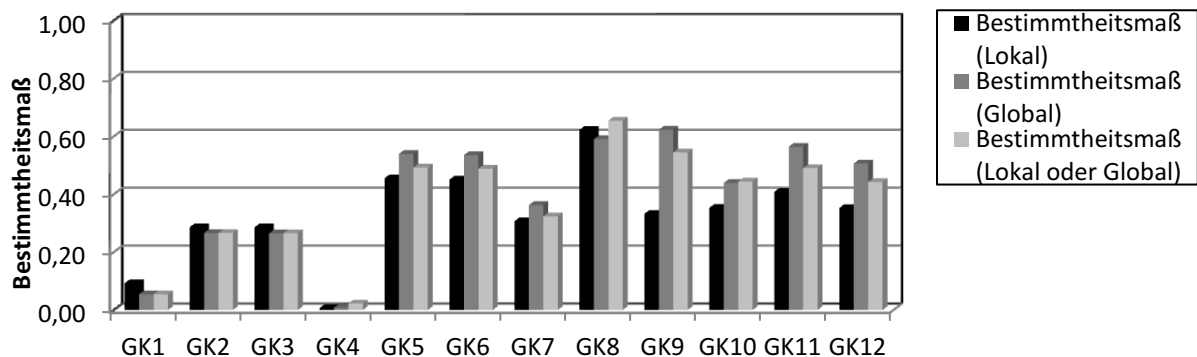


Abbildung F.2: Regressionsanalyse des Validierungsversuchs: $\approx 0,01 \text{ cd/m}^2$; Beobachtungsrichtung HV

Umfeldleuchtdichte

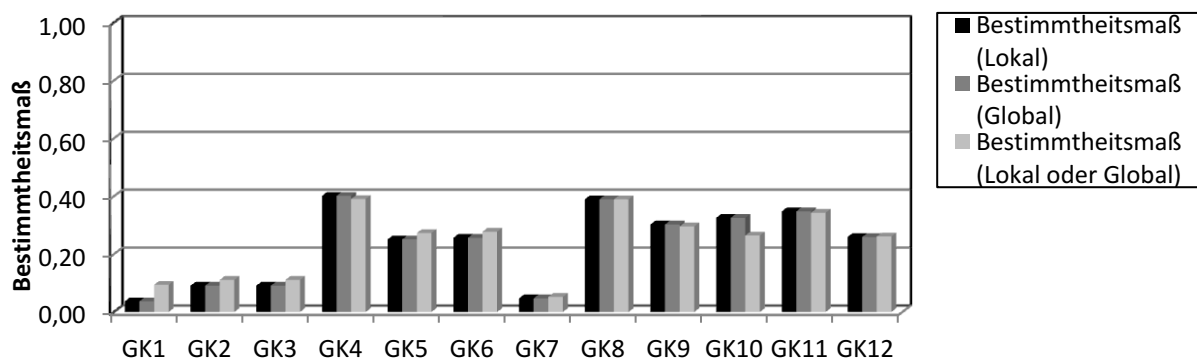


Abbildung F.3: Regressionsanalyse des Validierungsversuchs: $\approx 0,01 \text{ cd/m}^2$; Beobachtungsrichtung $H=30^\circ$

Umfeldleuchtdichte

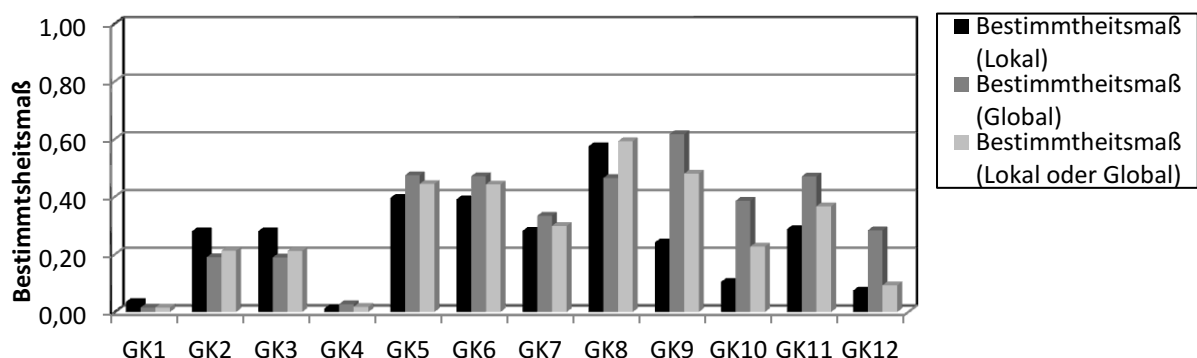


Abbildung F.4: Regressionsanalyse des Validierungsversuchs: Umfeldleuchtdichte $\approx 3 \text{ cd/m}^2$; Beobachtungsrichtung HV

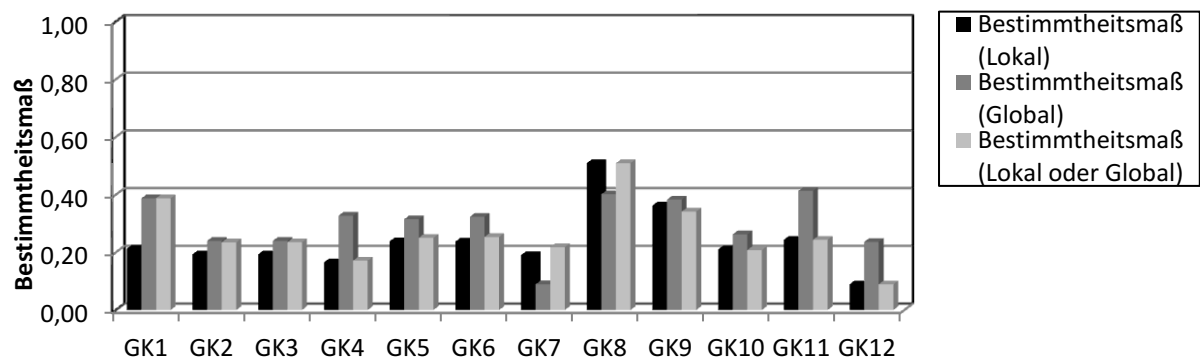


Abbildung F.5: Regressionsanalyse des Validierungsversuchs: Umfeldleuchtdichte $\approx 3 \text{ cd/m}^2$; Beobachtungsrichtung $H=30^\circ$

F.3.2 Darstellung der Korrelationsanalyseergebnisse

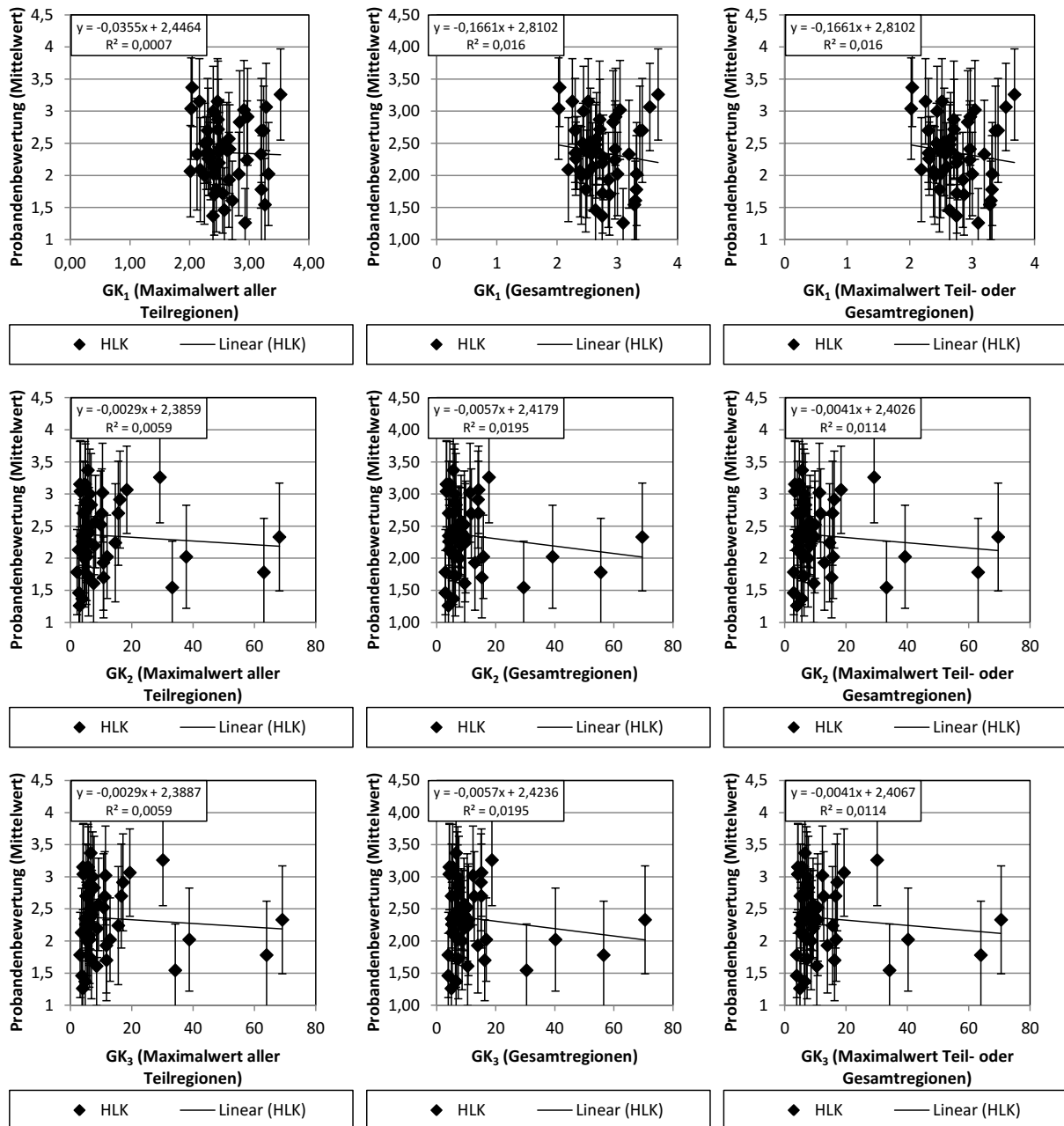


Abbildung F.6: Korrelationsanalyse des Validierungsversuchs: Umfundleuchtdichte $\approx 0,01 \text{ cd/m}^2$ und $\approx 3 \text{ cd/m}^2$; Beobachtungsrichtung $H=0^\circ$ und $H=30^\circ$ - Teil 1

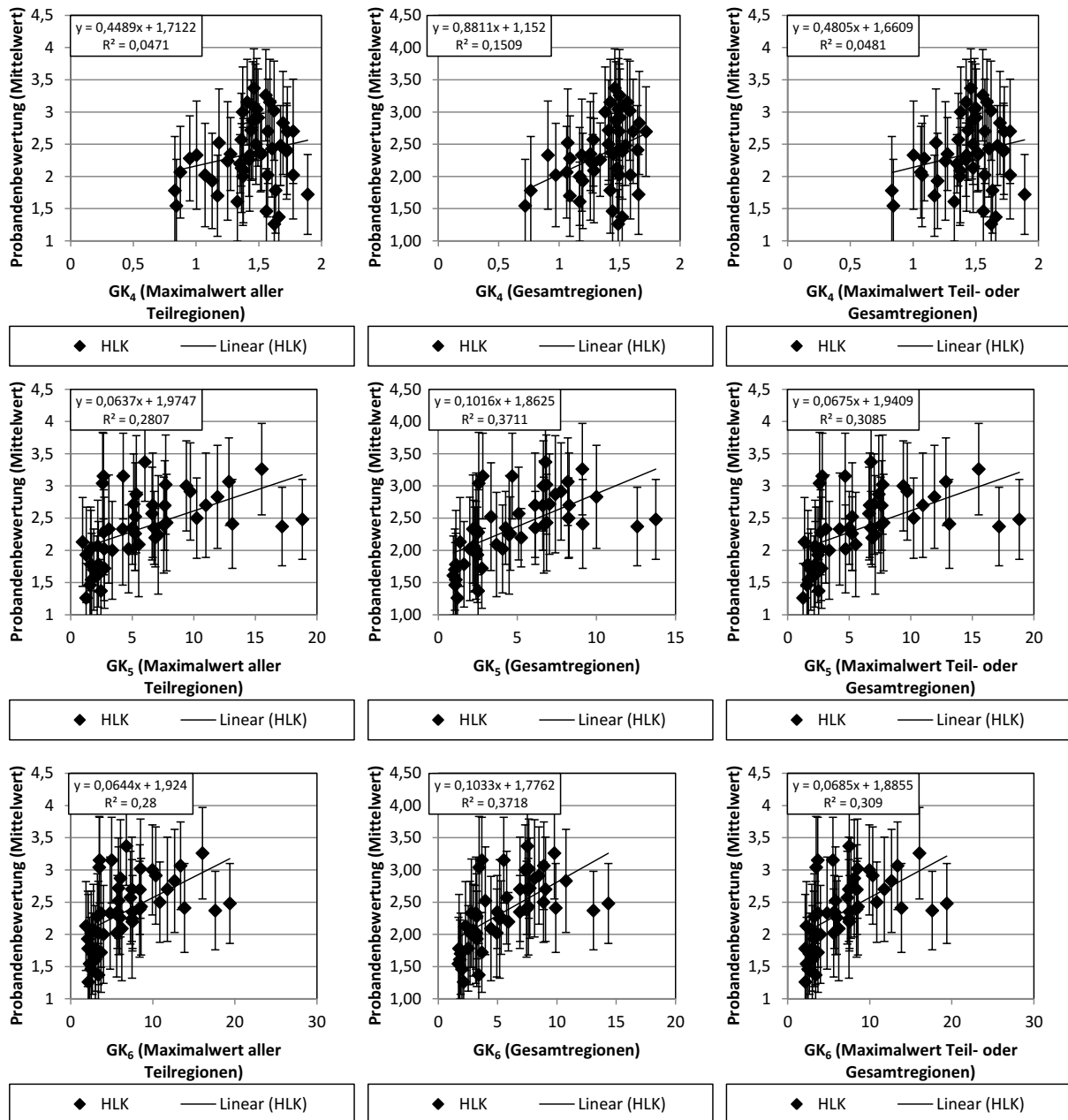


Abbildung F.7: Korrelationsanalyse des Validierungsversuchs: Umfeldleuchtdichte $\approx 0,01 \text{ cd/m}^2$ und $\approx 3 \text{ cd/m}^2$; Beobachtungsrichtung $H=0^\circ$ und $H=30^\circ$ - Teil 2

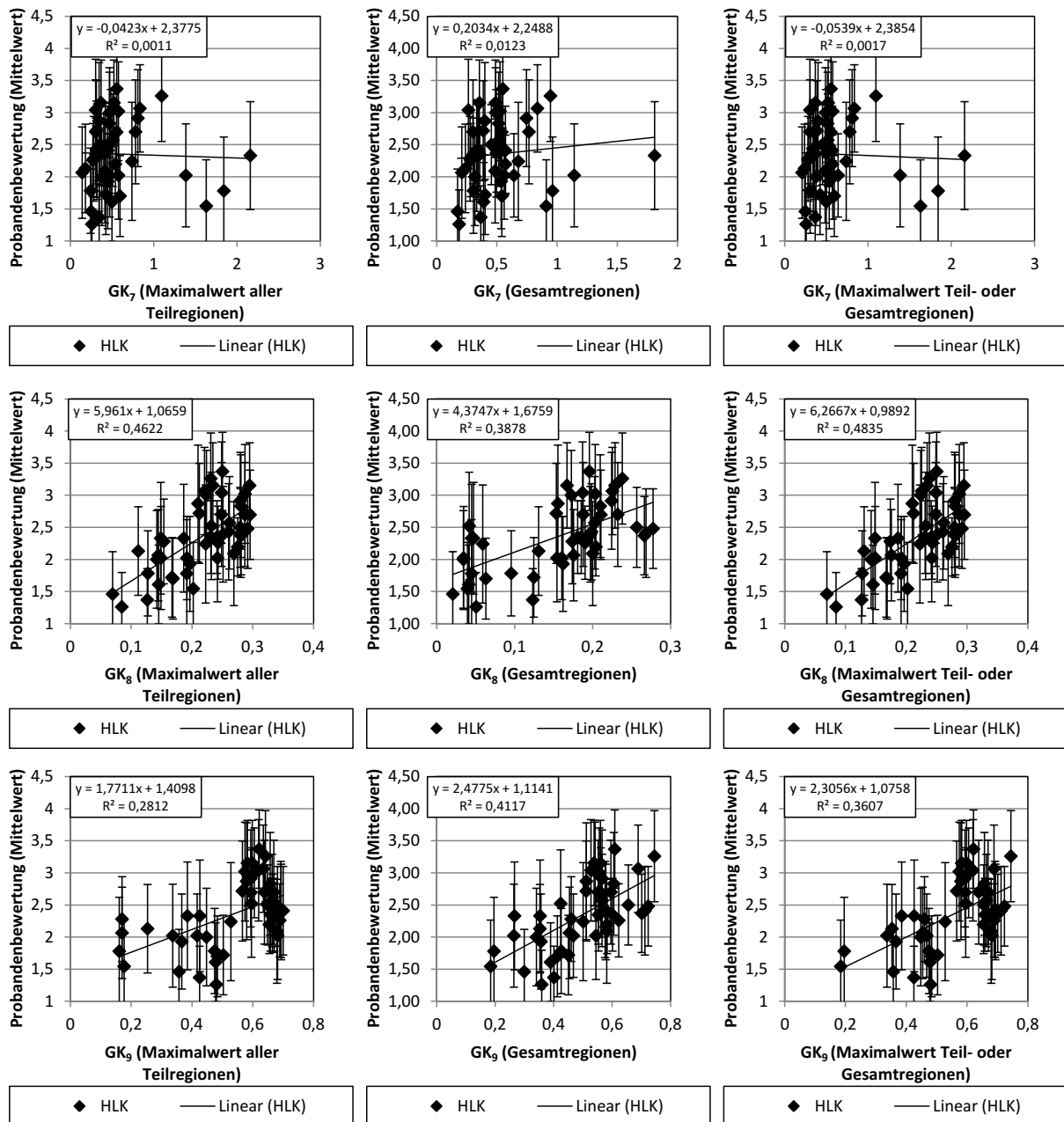


Abbildung F.8: Korrelationsanalyse des Validierungsversuchs: Umfeldleuchtdichte $\approx 0,01 \text{ cd/m}^2$ und $\approx 3 \text{ cd/m}^2$; Beobachtungsrichtung $H=0^\circ$ und $H=30^\circ$ - Teil 3

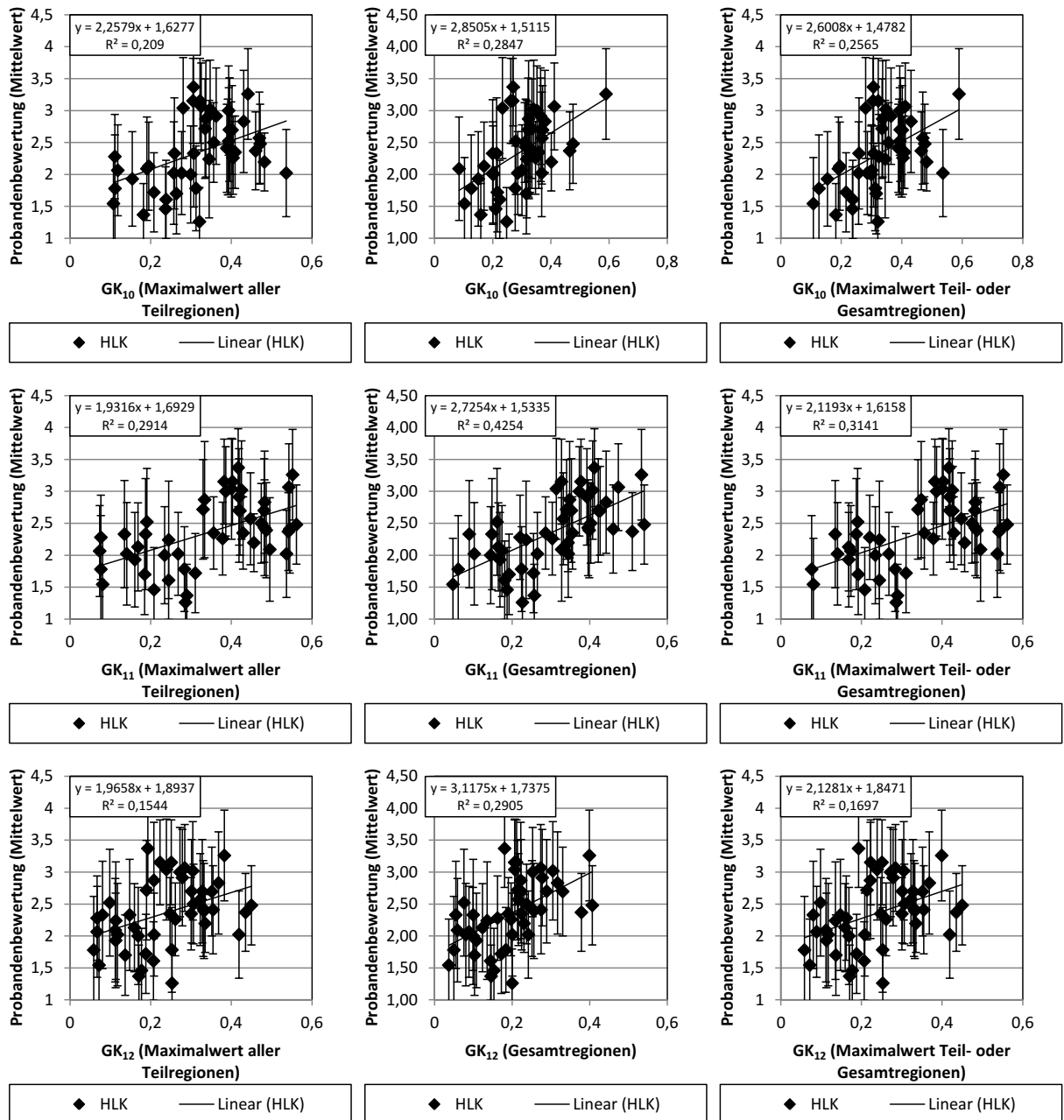


Abbildung F.9: Korrelationsanalyse des Validierungsversuchs: Umfeldleuchtdichte $\approx 0,01 \text{ cd/m}^2$ und $\approx 3 \text{ cd/m}^2$; Beobachtungsrichtung $H=0^\circ$ und $H=30^\circ$ - Teil 4

Anhang G – Kontrastschwellenmodell nach Adrian

Berechnungsformel:

Die Gleichung zur Berechnung der Unterschiedsschwelle nach Adrian lautet [2]:

$$\Delta L = 2,6 \cdot \underbrace{\left(\frac{\Phi^{0,5}}{\alpha} + L^{0,5} \right)^2}_{F_S} \cdot F_{CP} \cdot F_T \cdot F_A$$

G.1 Testzeichengröße F_S

$$F_S = \left(\frac{\Phi^{0,5}}{\alpha} + L^{0,5} \right)^2$$

Tabelle G.1: Testzeichengrößenfaktoren $\Phi^{0,5}$ und $L^{0,5}$

L_a	$L_a \geq 0,6 \text{ cd/m}^2$
$\Phi^{0,5}$	$\log(4,1925 L_a^{0,1556} + 0,1684 L_a^{0,5867})$
$L^{0,5}$	$0,05946 L_b^{0,466}$
L_a	$0,00418 \text{ cd/m}^2 < L_a < 0,6 \text{ cd/m}^2$
$\Phi^{0,5}$	$\exp(-0,072 + 0,3372 \log L_a + 0,0866 (\log L_a)^2)$
$L^{0,5}$	$\exp(-1,256 + 0,319 \log L_a)$
L_a	$L_a \leq 0,00418 \text{ cd/m}^2$
$\Phi^{0,5}$	$\exp(0,028 + 0,173 \log L_a)$
$L^{0,5}$	$\exp(-0,891 + 0,5275 \log L_a + 0,0227(\log L_a)^2)$

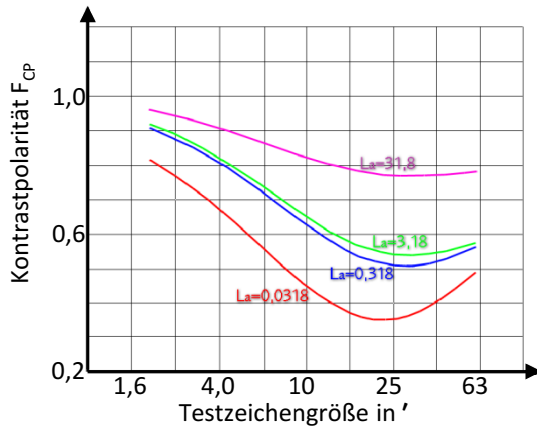
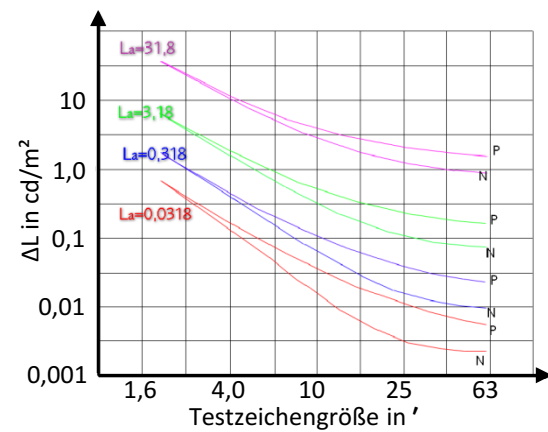
G.2 Testzeichenkontrastpolarität F_{CP}

$$F_{CP} = 1 - \frac{m\alpha^{-\beta}}{2,4\Delta L_T}$$

Tabelle G.2: Kontrastpolaritätsfaktoren $\Phi^{0,5}$ und $L^{0,5}$

L_a	$L_a \geq 0,1 \text{ cd/m}^2$
m	$10^{-10-(0,125(\log L_a+1)^2+0,0245)}$
L_a	$L_a \geq 0,004 \text{ cd/m}^2$
$m = 10^{-10-(0,075(\log L_a+1)^2+0,0245)}$	

Für alle L_a
 $\beta = 0,6L_a^{-0,1488}$

(a) Einfluss des Kontrastpolaritätsfaktors F_{CP} in Abhängigkeit der Testzeichengröße(b) Einfluss des Kontrastpolaritätsfaktors F_{CP} auf die SchwellenleuchtdichteAbbildung G.1: Einfluss des Kontrastpolaritätsfaktors F_{CP} nach [2] (entnommen aus [32])

G.3 Darbietungsdauer F_T

$$F_T = \frac{F_{T_0}(\alpha, L_a) + t}{\frac{(F_{T_0}(\alpha)^2 + F_{T_0}(L_a)^2)^{0,5}}{2,1}}$$

$$F_{T_0}(\alpha) = 0,36 - 0,0972 \cdot \frac{(\log \alpha + 0,523)^2}{(\log \alpha + 0,523)^2 - 2,513(\log \alpha + 0,523) - 2,7895}$$

$$F_{T_0}(L_a) = 0,355 - 0,1217 \cdot \frac{(\log L_a + 6)^2}{(\log L_a + 6)^2 - 10,4(\log L_a + 6) + 52,28}$$

G.4 Altersfaktor F_A

Tabelle G.3: Altersfaktor F_A

$Alter$	$23 < Alter < 64$
F_A	$\frac{(Alter-19)^2}{2160} + 0,99$
L_a	$64 < Alter < 75$
F_A	$\frac{(Alter-56,6)^2}{116,3} + 1,43$

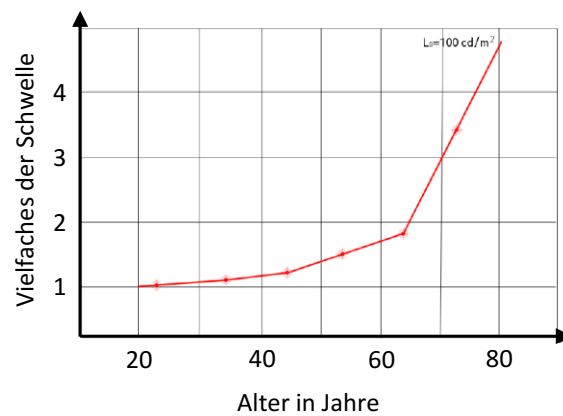


Abbildung G.2: Einfluss des Alters auf die Kontrastschwelle nach [2] (entnommen aus [32])

Literaturverzeichnis

- [1] A2MAC1.COM: *Automotive Benchmarking*. www.a2mac1.com. Version: 2012
- [2] ADRIAN, W.: Visibility of targets: Model for calculation. In: *Lighting Research and Technology* 21 (1989), S. 181–188
- [3] ANSI: ANSI C78.376-1996: Specifications for the chromaticity of fluorescent lamps. American National Standard for Electric Lamps / American National Standards Institute. 1996. – Forschungsbericht
- [4] ANSI: ANSI NEMA ANSLG C78.377-2008 - Specifications for the Chromaticity of Solid State Lighting Products / American National Standards Institute. 2008. – Forschungsbericht
- [5] ANSI/IESNA: RP-8-00 - Roadway Lighting / American National Standards Institute/Illuminating Engineering Society of North America. 2000. – Forschungsbericht
- [6] ARMBRUSTER, D.: *Optimierung der visuellen Informationsübermittlung durch adaptive Kraftfahrzeugleuchten*, Technische Universität Darmstadt, Diss., 2001
- [7] BAER, R.: *Beleuchtungstechnik: Grundlagen*. Huss-Medien, 2006 (Bd. 100; Bd. 103)
- [8] BAIER, R. ; FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRASSEN- UND VERKEHRSWESSEN. ARBEITSGRUPPE STRASSENENTWURF: *Richtlinien für die Anlage von Stadtstraßen: RASSt 06*. FGSV-Verl., 2007 (FGSV)
- [9] BIESKE, K.: *Über die Wahrnehmung von Lichtfarbenänderungen zur Entwicklung dynamischer Beleuchtungssysteme*, Technische Universität Ilmenau, Diss., 2010
- [10] BLACKWELL, H.R.: CIE Report 19: An Analytic Model for Describing the Influence of Lighting Parameters upon Visual Performance / Commission Internationale de l'Éclairage. 1981 (CIE 019.21). – Forschungsbericht
- [11] BMW GROUP: *BMW entwickelt Laserlicht fürs Auto*. <https://www.press.bmwgroup.com>. Version: September 2011
- [12] BOL, J. ; DECKER, H.-J.: *Verbesserung der Heckbeleuchtung von Kraftfahrzeugen*. Düsseldorf : VDI-Verlag GmbH, 1971
- [13] BOYNTON, R. M.: Physical measures of stray light in the eye. In: *Journal of the Optical Society of America* 44 (1954), S. 879

- [14] BRONSTEIN, I.N. ; SEMENDJAJEW, K.A.: *Taschenbuch der Mathematik*. Harri Deutsch, 2008
- [15] BUECHAN, X.: *Darstellung zur Illustration der typischen Homogenitätsbewertungsszenarien (unveröffentlicht)*
- [16] BUNDESMINISTERIUMS FÜR VERKEHR, BAU UND STADTENTWICKLUNG: *Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung StVZO*. 2007. - 40. Ergänzungslieferung
- [17] CHANG, L. ; TAN, Y.-P. ; CHUA, H.-C.: Detection and Removal of Rainboweffect Artifacts. In: *Proc. IEEE Int. Conf. Image Processing ICIP 2007* Bd. 1, 2007, S. 297–300
- [18] COHEN, J.: *Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences*. Lawrence Erlbaum Associates, Incorporated, 1988. – ISBN 9780805802832
- [19] COMMISSION INTERNATIONALE DE L'ÉCLAIRAGE: *CIE Report 100: Fundamentals of the visual task of night driving*. 1992
- [20] COMMISSION INTERNATIONALE DE L'ÉCLAIRAGE: *CIE Report 95: Contrast and Visibility*. 1992
- [21] COMMISSION INTERNATIONALE DE L'ÉCLAIRAGE: *CIE Report 135: Visual Adaptation to Complex Luminance Distribution*. 1999
- [22] COMMISSION INTERNATIONALE DE L'ÉCLAIRAGE: *CIE Report 146: Equations for disability glare*. 2002
- [23] CORPORATION NICHIA: *NICHIA LED Catalogue 2011 01 06*. NICHIA, 06 2011. http://www.nichia.co.jp/specification/catalogue/2011_01/category/NICHIA_LED_Catalogue2011_01_06.pdf
- [24] CORPORATION NICHIA: *Shipping Inspection Report - Chip Type White LED - Modellnummer: NJSW036BT - Color Rank:cx4*. November 2011
- [25] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMIERUNG E.V: *DIN 1349 Durchgang optischer Strahlung durch Medien Teil 1: Optisch klare Stoffe Größen, Formelzeichen und Einheiten*. 1972
- [26] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMIERUNG E.V: *DIN 5031 Strahlungsphysik im optischen Bereich und Lichttechnik Teil 1: Begriffsdefinitionen*. 1982
- [27] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMIERUNG E.V: *DIN 5035 Arbeitsplatzleuchten Teil 8: Anforderungen, Empfehlungen und Prüfung*. 2007
- [28] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMIERUNG E.V: *DIN 5033 Farbmessung Teil 1: Grundbegriffe der Farbmessung*. 2009
- [29] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMIERUNG E.V: *DIN 5033 Farbmessung Teil 2: Normvalenz-Systeme*. 2009
- [30] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMIERUNG E.V: *DIN EN ISO 11664-5 - CIE 1976 $L^*u^*v^*$ Farbenraum und gleichabständige $u'v'$ -Farbtafel (ISO 11664-5:2009)*. 2011

- [31] DOMININGHAUS, H. ; EYERER, P. ; ELSNER, P. ; HIRTH, T.: *Die Kunststoffe und ihre Eigenschaften*. Springer, 2004 (VDI-Buch). – 690; 1021 S.
- [32] DREYER, D.: *Kontrastschwellensimulation für Sichtbarkeitsuntersuchungen an Displays*, Technische Universität München, Diss., 2006
- [33] ECKERT, M.: *Lichttechnik und optische Wahrnehmungssicherheit im Straßenverkehr*. Verlag Technik GmbH, 1993 (1. Aufl.)
- [34] ENGEL, F. L.: Visual conspicuity directed attention and retinal locus. In: *Vision Research* 11 (1971), S. 563–576
- [35] EUROPÄISCHE WIRTSCHAFTSGEMEINSCHAFT: *Fahrzeugtechnik EWG ECE: Richtlinie 48 Rev 05 d. Europ. Wirtschaftsgemeinschaft f. Straßenfahrzeuge (EWG-Richtlinien) u. Regelungen d. Econom. Comm. F. Europe f. Kraftfahrzeuge u. ihre Anhänger (ECE-Regelungen)*. 2012
- [36] EUROPÄISCHE WIRTSCHAFTSGEMEINSCHAFT: *Fahrzeugtechnik EWG ECE: Richtlinien d. Europ. Wirtschaftsgemeinschaft f. Straßenfahrzeuge (EWG-Richtlinien) u. Regelungen d. Econom. Comm. F. Europe f. Kraftfahrzeuge u. ihre Anhänger (ECE-Regelungen)*. 2012
- [37] FECHNER, G.T.: *Elemente der Psychophysik*. Breitkopf und Härtel Leipzig, 1834
- [38] FINCH, D. M.: Automotive Signaling and Lighting. In: *SAE Technical Paper* 700385 (1970)
- [39] FITZGIBBON, A. W. ; PILU, M. ; FISHER, R. B.: Direct least-squares fitting of ellipses. In: *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence* 21 (1999), Mai, Nr. 5, S. 476–480
- [40] FREI, U. ; BRANDL, M. ; SINGER, F.: High Power Multichip LEDs for Frontlighting Applications - The Evolution Continues. In: *9th International Symposium on Automotive Lighting*, Herbert Utz Verlag GmbH, 2011, S. 286–295
- [41] GOCKE, T.: Objective colour rating system of automotive signal functions with more than one light source. In: *9th International Symposium on Automotive Lighting*, Herbert Utz Verlag GmbH, 2011, S. 671–680
- [42] GOCKE, T. ; SCHREIER, P.: Objektivierung der Homogenitätsbewertung von Signalleuchten. In: *VDI-Berichte 2154: Optische Technologien in der Fahrzeugtechnik*, 2012, S. 257–271
- [43] GOLDSTEIN, E. B.: *Wahrnehmungspsychologie: Der Grundkurs*, 7. Aufl. Spektrum Akademischer Verlag, 2007
- [44] GÖTZE, J.: *Vorlesung Adaptive Filter: Theorie und Anwendung*. Technische Universität Dortmund - Fakultät Elektrotechnik - Arbeitsgebiet Datentechnik, 2007
- [45] HAHN, N. ; MENSCH, D. ; KOETH, K. ; MANZ, K.: Analysis of homogeneity from signal lamps by luminance. In: *8th International Symposium on Automotive Lighting*, Herbert Utz Verlag GmbH, 2009, S. 701–712
- [46] HAYAKAWA, M.: ILA / D-ILASuper Projectors for the Present and the Future. (2000)

- [47] HAYKIN, S.S.: *Adaptive filter theory*. Prentice Hall, 2002 (Prentice-Hall information and system sciences series)
- [48] HENTSCHEL, H.J.: *Licht und Beleuchtung: Theorie und Praxis der Lichttechnik*. Hüthig, 1994
- [49] HLOUCAL, T.-M.: *Der Einfluss der aktuellen Befindlichkeit auf die Wahrnehmung neutraler Stimuli in free-viewing-tasks - Eine Eyetrackingstudie*, Universität Osnabrück, Diss., 2010
- [50] IESNA ROADWAY LIGHTING COMMITTEE. STANDARD PRACTICE SUBCOMMITTEE AND ILLUMINATING ENGINEERING SOCIETY OF NORTH AMERICA AND AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE: *Roadway lighting*. Illuminating Engineering Society of North America, 2000 (Recommended Practices Series)
- [51] KAISER, P. K. ; BOYNTON, R. M.: *Human Color Vision*. 2nd edition. Optical Society of America, 1996
- [52] KALTENBACH, A.: *Demonstratorentwicklung einer circadianen Beleuchtungsanlagensteuerung und Untersuchung zur Wahrnehmung von Lichtfarbenänderungen*, Technische Universität Ilmenau, Diplomarbeit, 2005
- [53] KALTENBACH, A.: *Entwicklung einer intelligenten Heckleuchte zur adaptiven Anpassung der Lichtsignale an variable Sichtbedingungen*, Technische Universität Ilmenau, Diss., 2009
- [54] KLEINKES, M.: *Objektivierte Bewertung des Gütekriteriums Homogenität für Scheinwerfer-Lichtverteilungen*, Universität Bielefeld, Diss., 2003
- [55] KOKOSCHKA, S.: *Das Lichttechnische Institut der Universität Karlsruhe von 1961-1971 - Kapitel: Über die Kontrastempfindlichkeit bei konstanter Adaptation aber variabler Objektleuchtdichte*. LTI der Universität Karlsruhe, 1972. – 91–102 S.
- [56] KOKOSCHKA, S. ; BODMANN, H. (Hrsg.): *Aspekte der Informationsverarbeitung - Kapitel: Zeichenkontrast und visuelle Leistung am Bildschirm*. Bd. Band 13. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1985. – 254–300 S.
- [57] KOKOSCHKA, S.: *Beleuchtung, Bildschirm, Sehen: experimentelle und theoretische Untersuchungen*. 1989
- [58] KOKOSCHKA, S.: *Grundlagen der Lichttechnik*. Universität Karlsruhe (TH) - Lichttechnisches Institut, 2011
- [59] KRAHN, H. ; EH, D. ; VOGEL, H.: *1000 Konstruktionsbeispiele für den Werkzeug- und Formenbau beim Spritzgießen*. Hanser, 2008
- [60] KRAJC, T.: *LED-Technik im Automobilbau - Technische Möglichkeiten und Akzeptanz beim Kunden / Hochschule München*. 2010. – Forschungsbericht

- [61] KRÜGER, U. ; SCHMIDT, F.: Spatially Resolved Measurement of Interior and Ambient Light in the Automotive Environment. In: *6th International Symposium on Automotive Lighting*, Herbert Utz Verlag GmbH, 2005, S. 1010 – 1017
- [62] KUCKARTZ, U. ; RÄDIKER, S. ; EBERT, T. ; SCHEHL, J.: *Statistik: Eine verständliche Einführung*. VS Verlag für Sozialwissenschaften, 2010. – ISBN 9783531166629
- [63] LANGENSCHIEDT-REDAKTION: *Langenscheidt Euro-Wörterbuch Griechisch: Griechisch-Deutsch, Deutsch-Griechisch*. Langenscheidt, 2008 (Langenscheidt Euro-Wörterbücher). – ISBN 9783468122118
- [64] LERMAN, S.: *Radiant energy and the eye*. Macmillan, 1980 (Functional ophthalmology)
- [65] MACADAM, D. L.: Visual Sensitivities to Color Differences in Daylight. In: *Optical Society of America* 32 (1942), S. 247–274
- [66] MACADAM, D. L.: Specification of Small Chromaticity Differences. In: *Optical Society of America* 33 (1943), S. 18–26
- [67] MAYER, H.O.: *Einführung in die Wahrnehmungs-, Lern- und Werbe-Psychologie*. Oldenbourg Wissenschaftlicher Verlag, 2005 (Edition Psychologie)
- [68] MENSCH, D.: *Untersuchung zur Bewertung der Gleichmäßigkeit von Kfz-Signallichtfunktionen*, Technische Universität Ilmenau, Diss., 2012
- [69] MOON, P. ; SPENCER, D. E.: On the Stiles-Crawford effect. In: *Journal of the Optical Society of America* 34, 1944, S. 319–329
- [70] MOOSBRUGGER, H. ; KELAVA, A.: *Testtheorie und Fragebogenkonstruktion*. Springer Verlag, 2011 (Springer-Lehrbuch)
- [71] MORTIMER, R.G.: Psychological Research in Automobile Rear Lighting. In: *SAE Technical Paper Series* No. 700388 (1970), S. 586–598
- [72] MUELLER-MACH, R. ; MUELLER, G.: White light emitting diodes for illumination. In: *Proc. SPIE* 3938 (2000), S. 30–41
- [73] MUELLER-MACH, R. ; MUELLER, G. ; U.A.: Highly efficient all-nitride phosphor-converted white light emitting diode. In: *phys. stat. sol.* No. 9 (2005), S. 1727–1732
- [74] NARENDRAN, N. ; U.A.: Developing color tolerance criteria for white LEDs / Lighting Research Center Rensselaer Polytechnic Institute. 2004. – Forschungsbericht
- [75] NARENDRAN, N. ; VASCONEZ, S. ; BOYCE, P. ; U.A.: Just-perceivable color differences between similar light sources in display lighting applications. In: *Journal of the Illuminating Engineering Society* 29 (2000), S. 68–77
- [76] NATIONAL HIGHWAY TRAFFIC SAFETY ADMINISTRATION: *Federal Motor Vehicle Safety Standard (FMVSS108)*. 2011

- [77] OHM, J.R. ; LÜKE, H.D.: *Signalübertragung Grundlagen Der digitalen und analogen Nachrichtenübertragungssysteme*. Springer, 2010 (Springer-Lehrbuch). – ISBN 9783642102004
- [78] OSRAM: *LR G6SP - Technical Datasheet*, April 2011. catalog.osram-os.com
- [79] OSRAM: *Osram Advanced Power TOPLED - Technical Datasheet*. Osram, Mai 2011
- [80] OSRAM: *Osram OSTAR - Technical Datasheet*. Osram, September 2011
- [81] OSRAM: *Produktdaten - Ultra Life 7506ULT*, Mai 2012. www.osram.de
- [82] OSTERBERG, G.: Topography of the layer of rods and cones in the human retina. In: *Acta Ophthalmologica* 6 (1935), S. 1–102
- [83] PEDROTTI, F. ; U.A.: *Optik für Ingenieure - Grundlagen*. 2. Auflage. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2002
- [84] PHILIPS LUMILEDS (Hrsg.): *LUXEON Rebel ES - Technical Datasheet DS61*. Philips LUMILEDS, <http://www.philipslumileds.com/uploads/17/DS61-pdf>
- [85] PHILIPS LUMILEDS (Hrsg.): *LUXEON Rebel Automotive Specification - Technical Datasheet DS58*. Philips LUMILEDS, 2009
- [86] REIF, K. ; DIETSCHKE, K.-H. ; U.A.: *Bosch KFZ-Taschenbuch*. 27. Auflage. Vieweg+Teubner Verlag, 2011
- [87] REISCH, M.: *Halbleiter-Bauelemente*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2005
- [88] RICHTER, M.: *Einführung in die Farbmeterik*. De Gruyter, 1981 (Sammlung Göschen Series)
- [89] RICHTER, M.: *Faszination Licht - Dynamik durch Technologie und Design*. Hella KGaA Hueck & Co. - Pressemitteilung. www.hella-press.com. Version: Februar 2010
- [90] RIPPERGER, J.: *Lichttechnische Anforderungen an Schluß- und Bremsleuchten für Kraftfahrzeuge*, Technische Universität Darmstadt, Diss., 2001
- [91] RITZHAUPT-KLEISSEL, E. ; HAUSSELT, J.: Neuartige Polymer-Nanokomposite mit gezielt einstellbarem Brechungsindex: Materialeigenschaften und Anwendungspotenziale in der Mikrooptik. In: *Mikrosystemtechnik Kongress 2005 - 10. bis 12. Oktober 2005 in Freiburg*, VDE-Verl., 2005, 577–580
- [92] SACHS, L.: *Angewandte Statistik*. Springer, 2003
- [93] SANCHEZ, J.M. ; FAIRCHILD, M.D.: Quantification of the Helmholtz-Kohlrausch effect for CRT color monitors. In: *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series* Bd. 4421, 2002 (Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series), S. 607–610
- [94] SCHIERZ, C.: Wie wird Leuchtdichte subjektiv als Helligkeit wahrgenommen? In: *Lux junior 2007 TU Ilmenau, FG Lichttechnik*, 2007

- [95] SCHMIDT-CLAUSEN, H.-J.: Optimum Luninaces and Areas of Rear-Position Lamps and Stop Lamps. In: *10th International Conference on Experimental Safety Vehicles*, 1985
- [96] SCHMIDT-CLAUSEN, H.-J.: 40 Jahre Lichttechnik Darmstadt 1956-1996 - Kapitel: Möglichkeiten zur Verbesserung des Signalbildes Bremsen bei Kraftfahrzeugen. 1996. – 250–260 S.
- [97] SCHMIDT-CLAUSEN, H.-J.: *Grundlagen der Lichttechnik*. 1998
- [98] SCHMIDT-CLAUSEN, H.-J. ; LANGE, H.: *Handbuch für Beleuchtung*. Ecomed, 1992
- [99] SCHMIDTKE, H.: *Ergonomie 2 - Gestaltung von Arbeitsplatz und Arbeitsumwelt*. Hanser Fachbuch, 1974
- [100] SCHRÖDTER, A.: Flimmern und Flimmerverschmelzungsfrequenz beim Betrieb von Scheinwerfern und Leuchten mit LED-Technik. In: *Licht* Volume 9 (2007), S. 722 – 728
- [101] SCHREIER, P.: *Messtechnische Bewertung der Homogenität von Signalleuchten*, Technische Universität Ilmenau, Diplomarbeit, 2011
- [102] SEIDL, A. ; KRÜGER, W. ; SPEYER, H. ; FORSCHUNGSVEREINIGUNG AUTOMOBILTECHNIK E.V. ; (KAISERSLAUTERN), TECMATH G.: *Mathematische Nachbildung des Menschen: RAMSIS-3D-Softdummy*. Autoverband, 1997 (FAT Schriftenreihe)
- [103] SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS: *SAE J578: Color Specification*. Juni 2002
- [104] STILES, W.S. ; CRAWFORD, B.H.: The luminous efficiency of rays entering the eye pupil at different points. In: *Proceedings of the Royal Society of London Series B, Biological Sciences* 112, 1933, S. 428–450
- [105] STRAUSS, S.: *Theoretische und experimentelle Untersuchungen zum Einsatz gepulster Halbleiterlichtquellen in der Kraftfahrzeugbeleuchtung*. – - unveröffentlicht
- [106] THIELE, E. ; GALL, D.: Adaptationsleuchtdichte und mittlere Leuchtdichte bei direktem und indirektem Sehen. In: *Wissenschaftliche Zeitung der Technischen Hochschule Ilmenau* 14 (1968), S. 321–325
- [107] TROLAND, L.T.: On the measurment of visual intensities. In: *Journal of experimental Psychology* 2 (1917), S. 1–33
- [108] UNE-EN: *Ophthalmic optics - Visual acuity testing - Standard optotype and its presentation (ISO 8596:2009)*. 2010
- [109] VASCONEZ, S.: *Discriminable color difference criteria for lighting applications*, Lighting Research Center Rensselaer Polytechnic Institue, Diplomarbeit, 2000
- [110] VIEREGGE, T.: OLEDs - Potential and challenges for automotive lighting. In: *9th International Symposium on Automotive Lighting*, Herbert Utz Verlag GmbH, 2011, S. 453–459

- [111] WALTER, H.J.: *Gestalttheorie und Psychotherapie* - 3. Auflage. Opladen : Westdeutscher Verlag, 1994
- [112] WARD L., G. ; RUSHMEIER, H. ; PIATKO, C.: A Visibility Matching Tone Reproduction Operator for High Dynamic Range Scenes. In: *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics* 3 (1997), Januar, Nr. 4, S. 291–306
- [113] WARE, C.: *Information Visualization: Perception for Design*. Morgan Kaufmann, 2012 (Interactive Technologies Series)
- [114] WEALE, R.A.: *Retinal illumination and age*. London, 1961
- [115] WEBER, E.H.: *De pulsu, resorptione, auditu et tactu - Annotations Anatomicae Et Physiologicae*. Koehler, 1834
- [116] WÖRDENWEBER, B. ; WALLASCHEK, J. ; BOYCE, P. ; HOFFMAN, D. D.: *Automotive Lighting and Human Vision*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007
- [117] WYSZECKI, G. ; W.S., Stiles: *Color Science: Concepts and Methods, Quantitative Data and Formulae*. Second Edition. Wiley Classics Library Edition, 2000